



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

# Fakultät Bauingenieurwesen

## **Verdunstung in bebauten Gebieten**

## **Evapotranspiration in Urban Areas**

Von der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

### **Dissertation**

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Ralf Harlaß aus Auerbach  
geboren am 16. Dezember 1961 in Radeberg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M.S. Raimund Herz  
Technische Universität Dresden

Prof. MLA Joachim Tourbier  
Technische Universität Dresden

Dr.-Ing. Mathias Kaiser  
Ingenieurbüro Kaiser, Dortmund

Tag der mündlichen Prüfung: 18. April 2008

## Zusammenfassung

Wasser- und Energiehaushalt eines Standorts bestimmen entscheidend die Lebensbedingungen des jeweiligen Ökosystems. Die Komponenten des Wasser- und Energiekreislauf stehen dabei in einem dynamischen Gleichgewicht, das durch eine Vielzahl klimatischer, geologischer und biologischer Faktoren bestimmt wird. Mit der Ausführung von Bauvorhaben wird in das Gleichgewicht eingegriffen. Entscheidend für die Beurteilung der damit verbundenen Folgen für die Umwelt sind die langfristigen Auswirkungen. Die Betrachtung einzelner Bemessungsereignisse ist dafür nicht ausreichend. Änderungen des Wasser- und Energiehaushalts können durch den Vergleich langjähriger mittlerer Jahresbilanzen des Einzugsgebietes vor und nach der Bebauung aufgezeigt werden. Bei der Genehmigung neuer Baugebiete müssen die Auswirkungen auf die Jahreswasserbilanz ein Entscheidungskriterium werden, wenn der Eingriff in den Naturhaushalt so gering wie möglich gehalten werden soll.

Von den Komponenten des Wasserhaushalts hat die Verdunstung eine besondere Bedeutung, da sie den Wasserkreislauf und den Energiekreislauf miteinander verbindet. Die Verdunstung kann als Klimaanlage der Erde bezeichnet werden, denn dabei wird die von der Sonne auf die Erdoberfläche eingestrahlte Wärmeenergie aufgenommen, als Wasserdampf in höhere Schichten der Atmosphäre transportiert und dort bei der Kondensation wieder ins Weltall abgestrahlt. Auf diese Weise wird eine Überhitzung der Erde verhindert und die Lebensbedingungen, an die sich die Lebewesen angepasst haben, werden über lange Zeiträume stabilisiert.

Von der Versiegelung der Oberflächen beim Bau von Straßen, Plätzen und Gebäuden ist die Verdunstung in der Jahresbilanz stärker als die anderen Komponenten des Wasserkreislaufs betroffen. Trotzdem werden bisher bei der Planung und Genehmigung neuer Baugebiete hauptsächlich der Oberflächenabfluss und in zunehmendem Maße die Versickerung untersucht. Die gravierende Reduzierung der Verdunstung wird zumeist vernachlässigt.

Die Verdunstung versiegelter Oberflächen ist im Vergleich zu bewachsenen Flächen stark reduziert. Ursache ist die fehlende Zwischenspeicherung des Wassers. Die Reduzierung der Verdunstung wirkt sich direkt auf den Energiekreislauf aus, da die nicht für den Verdunstungsprozess benötigte Energie in den bodennahen Schichten bleibt und den fühlbaren Wärmestrom erhöht. Bedingt durch den Jahresgang der Verdunstung, mit seinem Maximum im Sommer, ist dieser Erwärmungseffekt der Versiegelung dann besonders hoch, wenn ohnehin bereits viel Energie eingestrahlt wird.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Einflussfaktoren auf die Verdunstung erläutert und ein Überblick über die Berechnungsmethoden gegeben. Da die Verdunstung nur an der Oberfläche von Körpern stattfindet, werden für die Berechnung der Verdunstung im zweiten Teil die Oberflächen unbebauter und bebauter Gebiete systematisiert und in Landnutzungsarten unterteilt. Für alle Landnutzungsarten werden die hydrologischen und energetischen Eigenschaften und deren Auswirkungen auf den Wasser- und Energiehaushalt erläutert und die mittleren Jahresbilanzen berechnet.

Die Berechnungen werden nach dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren durchgeführt, das um zusätzliche Algorithmen für spezielle Landnutzungsarten in bebauten Gebieten ergänzt wurde. Die tatsächliche Verdunstung wird auf der Basis der Gras-Referenzverdunstung mit den Eigenschaften der Landnutzungsart ermittelt. Ausgangswerte sind langjährige meteorologische Jahresmittelwerte, die für das Territorium der Bundesrepublik frei verfügbar sind. Damit ist eine breite Anwendung des Verfahrens möglich. Die Verdunstung von Wasserflächen wird mit dem Temperaturgleichgewichtsverfahren berechnet. Die Jahresenergiebilanz kann ausgehend von der mittleren jährlichen Verdunstung mit der Albedo der Oberflächen und den örtlichen Strahlungsbedingungen aufgestellt werden. Mit den vorgestellten Verfahren können Einzugsgebiete von Bebauungsplangröße untersucht werden. Für eine unkomplizierte Berechnung wurden die teilweise nur iterativ lösbarer Algorithmen mithilfe der VBA-Programmiersprache in das Excel-Tabellenkalkulationsprogramm implementiert.

An zwei Beispielen wird das Verfahren angewandt, um die Auswirkungen der Landnutzungsänderung auf die Verdunstung und die Energiebilanz zu verdeutlichen. Dabei handelt es sich um die Erschließung eines Industriegebietes auf einer vorher land- und forstwirtschaftlich genutzten Fläche der vogtländischen Stadt Treuen sowie um den Neubau einer Untergrundstation im dicht bebauten Zentrum der schwedischen Großstadt Malmö.

Es werden Lösungen zur Beibehaltung eines möglichst hohen Verdunstungsanteils in bebauten Gebieten vorgeschlagen. Ansatzpunkt ist dabei stets die Zwischenspeicherung des Regenwassers für den im Vergleich zum Oberflächenabfluss langsamen Verdunstungsprozess. Am wirkungsvollsten sind dabei Dachbegrünungen, Wasserflächen und Bäume.

---

## Abstract

The water and energy balance of an area significantly determines the living conditions in a particular ecosystem. Influenced by a variety of climatic, geological and biological factors, the components of the hydro and energy cycle are related to each other in a dynamic system which is striving for equilibrium. Urban development is interfering with this system, causing long-term impacts which must be considered beforehand in planning. Coping with design storm events does not suffice. Changes of the water and energy balance resulting from construction can be calculated on the basis of long-standing annual average balances and compared with the balance in the catchment area before construction. Before granting building permission, the impacts on the water and energy balance should be evaluated in order to minimize interference with nature.

Among the components of the water balance, evapotranspiration is of special importance, not only because it is the largest one but also because it is connecting the water and the energy cycle. Evapotranspiration could be called the air-conditioner of the earth. In the process of evaporation, heat energy radiated by the sun onto the earth surface, is absorbed, transported as water vapour into upper layers of the atmosphere and there emitted by condensation. Thus overheating of planet earth is prevented and living conditions are maintained, to which currently existing organisms have adapted over a long period of time.

Evaporation is more intensely affected by the paving streets and squares and by constructing buildings through the sealing of surfaces than the other components of the hydrological cycle. However, up to now, in the process of design and planning permission of new development areas, the focus is on runoff and, increasingly, on infiltration of rain-water. The large reduction of evaporation is mostly neglected.

Evaporation on paved areas in urban development is, compared to vegetated surfaces, strongly reduced. The reason is the lack of buffer storage for water. The reduction of evaporation directly affects the energy cycle. Because energy which is not used for evaporation remains in the near-ground layers and generates sensible heat flows. This effect is perceived especially in summer time when, due to the seasonal cycle of radiation, there is plenty of energy available already.

In the first part of this thesis, the factors influencing evaporation are explained and an overview over the methods of calculation is given. Because evaporation only takes place on the surface, in the second part all surfaces of urban and natural areas are systematized and subdivided into types of land use for the calculation of evaporation. The hydrological and energy properties as well as their effects on the water and energy balance are elucidated for all types of land use and their average annual balances are calculated.

The calculations are performed with the BAGLUVA – water balance model, which was supplemented with additional algorithms for special types of land use in urban areas. The actual evaporation is ascertained on the basis of the potential evaporation as FAO reference evaporation with the properties of types of land use. Starting values are long-standing average annual meteorologic values, which are freely available for the whole territory of the Federal Republic. Thus, a broad application of the model is possible. The evaporation of water surfaces is calculated with the temperature balance model. Starting from the average annual evaporation with the surface albedo and the local terms of radiation, the annual energy balance can be determined. Some of the equations can only be solved by iterative algorithms. So they were implemented into EXCEL-spreadsheet by VBA-programming to ensure uncomplicated calculation. With the method presented, catchment areas of the size of urban layout plans can be analyzed.

The method is applied to two examples showing the impacts of land use change on evaporation and energy balance: the development of agricultural and forest land in Saxony into an industrial development site, and the impact of the construction of an underground station in the centre of the City Malmö, Sweden.

Solutions are presented for retaining in urban areas an evaporation rate as high as possible. Starting point hereby is always the buffer storage of rainwater for the process of evaporation, which is very slow compared to runoff. Most effective measures are the installation of rooftop greening, open water surfaces and trees.

Verzeichnis der Symbole, Abkürzungen und Einheiten .....	3
1    Veranlassung und Zielstellung .....	8
2    Theoretische Grundlagen .....	11
2.1    Verdunstungsprozess .....	11
2.2    Verdunstung im Naturhaushalt.....	12
2.3    Verdunstung in der Wasser- und Energiebilanz .....	16
2.4    Einflussfaktoren auf die Verdunstung.....	20
2.5    Ermittlung der Verdunstungshöhe.....	27
2.5.1    Mess- und Berechnungsverfahren .....	27
2.5.2    Jahresbilanz als Gradmesser der langfristigen Auswirkungen.....	30
2.5.3    Ermittlung der Verdunstung von Landflächen.....	32
2.5.4    Berechnung der Verdunstung von Landflächen mit dem BAGLUVA- Wasserhaushaltsverfahren.....	36
2.5.5    Ermittlung der Verdunstung von Wasserflächen.....	48
3    Wasser- und Energiebilanz in Abhängigkeit von der Landnutzung .....	52
3.1    Systematisierung der Oberflächen unbebauter und bebauter Gebiete .....	52
3.2    Berechnung der Wasser- und Energiebilanz .....	57
3.3    Wasser- und Energiebilanz unbebauter Gebiete .....	63
3.3.1    Landwirtschaftliche Flächen .....	64
3.3.2    Wälder und naturnahe Flächen .....	69
3.3.3    Wasserflächen .....	73
3.4    Wasser- und Energiebilanz bebauter Gebiete.....	78
3.4.1    Versiegelte Flächen .....	80
3.4.2    Bewachsene Flächen in bebauten Gebieten .....	87
3.4.3    Wasserflächen in bebauten Gebieten.....	102
3.5    Maßnahmen zur Erhöhung der Verdunstung in bebauten Gebieten.....	104
4    Anwendungsbeispiele .....	113
4.1    Auswirkungen der Landnutzungsänderung durch die Erschließung des Industrie- und Gewerbegebietes „Goldene Höhe“ in Treuen, Vogtlandkreis .....	114
4.1.1    Ausgangssituation.....	115
4.1.2    Gegenwärtige Situation.....	118
4.1.3    Hypothetisches Szenario einer verdunstungsorientierten Gestaltung.....	119
4.1.4    Auswirkung der Landnutzungsänderungen .....	120
4.1.5    Vorschläge für die weitere Bebauung.....	124
4.2    Auswirkungen des City-Tunnel-Projekts in Malmö auf den Wasser- und Energiehaushalt.....	126
4.2.1    Ausgangssituation.....	127
4.2.2    Temporäre Auswirkungen auf die Verdunstung während der Bauzeit .....	129
4.2.3    Dauerhafte Auswirkungen nach der Fertigstellung der Station Triangeln .....	133
4.2.4    Vergleich der Wasser- und Energiebilanzen der Ausgangssituation und der untersuchten Szenarien.....	135
5    Zusammenfassung und Ausblick.....	139
6    Literatur.....	143
Anhang A    Erläuterungen zum Berechnungsprogramm	
Anhang B    Lebenslauf	



## Verzeichnis der Symbole, Abkürzungen und Einheiten

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	-	Faktor zur Berücksichtigung des Anteils des Niederschlags im Sommerhalbjahr am Jahresniederschlag
$A_i, A_{ges}$	m <sup>2</sup>	Teilfläche, Gesamtfläche
B	mm/a	Berechnungsmenge
BFI	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Blattflächenindex
e	hPa	Dampfdruck der Luft
$e_s(T)$	hPa	Sättigungsdampfdruck bei Lufttemperatur
$e_s(Tw_o)$	hPa	Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur der Wasseroberfläche
ET	mm	langjähriger Mittelwert der Evapotranspiration
$ET_0$	mm	langjähriger Mittelwert der potenziellen Evapotranspiration als Gras-Referenzverdunstung
$ET_0^*$	mm/mon	vereinfachte Gras-Referenzverdunstung als Monatsmittelwert
$ET_a$	mm/a	langjähriger Mittelwert der tatsächlichen Evapotranspirationshöhe
$ET_{max}$	mm/a	langjähriger Mittelwert der landnutzungsabhängigen maximalen Evapotranspirationshöhe
f	-	Koeffizient im BAGLUVA-Verfahren zur Erfassung der Landnutzung
$f_H$	-	Koeffizient im BAGLUVA-Verfahren zur Erfassung von Hangneigung und Hangausrichtung
$f_{UL}$	-	Koeffizient im BAGLUVA-Verfahren zur Erfassung der urbanen Standortbedingungen von Pflanzen hinsichtlich der Lage in Grünflächen oder versiegelten Flächen
$f_{UW}$	-	Koeffizient im BAGLUVA-Verfahren zur Erfassung der urbanen Standortbedingungen von Pflanzen hinsichtlich der Wasserversorgung
G	W/m <sup>2</sup>	Bodenwärmestrom
h	m ü.NN	Stationshöhe
H	W/m <sup>2</sup>	Strom fühlbarer Wärme
k	-	Küstenfaktor
KR	mm	kapillaren Aufstiegsrate aus flurnahem Grundwasser

---

L	kJ/kg	Spezifische Verdampfungswärme
LE	W/m <sup>2</sup>	Verdunstungswärmestrom, latenter Wärmestrom
m	mm*s/(m*d*hPa)	Massentransportkoeffizient
n, n <sub>Bagrov</sub>	-	Effektivitätsparameter nach Bagrov
n <sub>k</sub>	-	korrigierter Effektivitätsparameter nach Bagrov
n <sub>M</sub>	-	Anzahl der Tage im Monat
P	mm	langjähriger Mittelwert der Niederschlagshöhe
P <sub>kor</sub>	mm	langjähriger Mittelwert der Niederschlagshöhe nach Korrektur der systematischen Messfehler
P <sub>kor, SHJ</sub>	mm	langjähriger Mittelwert der korrigierten Niederschlagshöhe im Sommerhalbjahr
Q <sub>n</sub>	-	Faktor zur Berücksichtigung des Anteils des Niederschlags im Sommerhalbjahr am Jahresniederschlag
R	mm	Gesamtabflusshöhe, enthält Versickerung und Oberflächenabfluss
R <sub>G</sub>	W/m <sup>2</sup>	Globalstrahlung
R <sub>L, E-A</sub>	W/m <sup>2</sup>	Betrag der langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche, der durch die langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre ausgeglichen wird
R <sub>n</sub>	W/m <sup>2</sup>	Nettostrahlung
R <sub>n</sub> <sup>*</sup>	W/m <sup>2</sup>	Verdunstungsäquivalent der Nettostrahlung
R <sub>nL</sub>	W/m <sup>2</sup>	effektive Abstrahlung der Oberfläche bei Lufttemperatur
ΔR <sub>nL</sub>	W/m <sup>2</sup>	Änderung der effektiven Abstrahlung infolge der Differenz zwischen Luft- und Wassertemperatur
R <sub>ob</sub>	mm	Oberflächenabfluss
R <sub>R</sub>	W/m <sup>2</sup>	reflektierte kurzwellige Strahlung
R <sub>vers</sub>	mm	Versickerung
s	hPa/K	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
ΔS	mm	Speicheränderung
S	h	tatsächliche Sonnenscheindauer
S <sub>0</sub>	h	astronomisch mögliche Sonnenscheindauer
T, T <sub>L</sub>	°C	Lufttemperatur

---

$T_O$	°C	Oberflächentemperatur
$T_{Wo}$	°C	Temperatur der Wasseroberfläche
$U$	%	relative Luftfeuchtigkeit
$UA$	a	Umtriebsalter bei Wald
$V$	W/m <sup>2</sup>	Energieeintrag durch Wasserzulauf in Gewässer
$v_{2m}$	m/s	mittlere Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe
$z_B$	cm	Pflanzenhöhe bei Grünland
$z_G$	m	Grundwasserflurabstand
$\alpha$	-	Albedo
$\sigma$	J/(cm <sup>2</sup> × K <sup>4</sup> )	Stefan-Boltzmann-Konstante; $\sigma = 0,4918 \times 10^{-6}$ J/(cm <sup>2</sup> × K <sup>4</sup> )
$\varepsilon$	-	Emissionskoeffizient
$\gamma$	hPa/K	Psychrometerkonstante; $\gamma = 0,65$ hPa/K
$\gamma^*$	hPa/K	modifizierte Psychrometerkonstante
$\Theta_{nFK}$	Vol-%	Bodenfeuchte bei nutzbarer Feldkapazität = Differenz des Volumenanteils des Wassers im Boden bei Feldkapazität und beim permanenten Welkepunkt

## **1 Veranlassung und Zielstellung**

Diese Dissertation schließt an meine 2002 an der Technischen Universität Dresden verteidigte Diplomarbeit zum Thema „Der natürliche Oberflächenabfluss und seine Bedeutung für die Regenwasserbewirtschaftung in Baugebieten“ an. Ausgangspunkt der damaligen Arbeit war die regelmäßige Forderung der Genehmigungsbehörden, dass der Oberflächenabfluss nach der Bebauung eines Gebietes nicht größer sein darf als der Abfluss des ursprünglichen unbebauten Gebietes. Die intensive Beschäftigung mit den Komponenten des Wasserkreislaufs - Niederschlag, Verdunstung, Versickerung, Oberflächenabfluss - und den darin wirkenden Faktoren führte zu der Erkenntnis, dass diese Forderung nur für ein einzeln betrachtetes Starkregenereignis erfüllt werden kann. In der Jahresbilanz ist die Summe des Oberflächenabflusses von bebauten Gebieten immer höher als vom vorher unbebauten Gebiet. Ursache dafür ist die hohe Verdunstung bewachsener Flächen, die durch den erheblichen Anteil versiegelter Flächen innerhalb bebauter Gebiete nicht mehr erreicht werden kann.

Das berechtigte Verlangen, dass der mit der Bebauung bisher unbebauter Gebiete unvermeidbare Eingriff in den Naturhaushalt so gering wie möglich zu sein hat, erfordert eine Betrachtung der Jahreswasserbilanz. Nur das Ausmaß der Änderungen der Jahresbilanz im Vergleich vor und nach der Bebauung zeigt, welche langfristigen Auswirkungen auf die Wasserbilanz zu erwarten sind. Die bisher übliche Betrachtung eines einzelnen Starkregenereignisses ist dafür nicht geeignet.

Fragen des Wasser- und Energiehaushaltes werden seit langem aus unterschiedlichen Blickwinkeln untersucht. Dennoch ist eine Vielzahl von damit verbundenen Problemen noch nicht zufrieden stellend gelöst. Dies betrifft besonders die Übertragung der Ergebnisse der nur punktuell möglichen Messungen auf räumliche Einzugsgebiete und die Erfassung der Wechselwirkung zwischen benachbarten Flächen mit unterschiedlichen hydrologischen Eigenschaften. Weiterhin ist festzustellen, dass die Verdunstung trotz ihres entscheidenden Anteils am Wasser- und Energiekreislauf in den meisten Fällen vernachlässigt oder lediglich als Restglied der Wasser- und Energiebilanz betrachtet wird.

Die Verdunstung ist sowohl für den Wasser- als auch den Energiekreislauf von Bedeutung. Sie koppelt diese Prozesse miteinander. Global gesehen ist der Verdunstungsprozess die Klimaanlage der Erde und verhindert die Überhitzung des Planeten. Veränderungen der Verdunstung beeinflussen nicht nur den Wasser- und sondern auch den Energiekreislauf. Die Reduzierung der Verdunstung durch die Zunahme des Oberflächenabflusses infolge versiegelter Flächen in bebauten Gebieten erhöht den Strom fühlbarer Wärme und trägt damit zur Erwärmung der unteren Schichten der Atmosphäre bei. Die Änderungen des Verdunstungsanteils sind ein Baustein im gegenwärtig stark diskutierten anthropogen bedingten Klimawandel.

In den letzten beiden Jahrzehnten hat in der Stadtentwässerung ein Umdenken begonnen. Anstelle der schnellen Ableitung des Niederschlagswassers über Kanalsysteme und anschließende konzentrierte Einleitung in den Vorfluter wird zunehmend eine dezentrale Rückhaltung, Abflussreduzierung und -vermeidung angestrebt. Diese, mit dem Begriff der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung zusammengefassten Maßnahmen, sind zurzeit überwiegend auf die Rückhaltung und anschließende Versickerung ausgerichtet. Belange der Verdunstung spielen dabei kaum eine Rolle. Ein Ausgleich der durch die Bebauung reduzierten Versickerung ist in vielen Fällen mit mehr oder weniger hohem technischem Aufwand, zum Beispiel durch Mulden-Rigolen-Systeme, möglich. Auf die wesentlich stärker verringerte Verdunstung haben diese Maßnahmen jedoch nur geringe Auswirkungen.

Ziel der Arbeit ist es, durch die Analyse der Wasser- und Energiebilanzen von natürlichen und bebauten Gebieten zu untersuchen, welche Möglichkeiten bei der Errichtung neuer Baugebiete sowie bei Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen bestehen, um die Auswirkungen der Bebauung auf den Natur- und Wasserhaushalt so gering wie möglich zu halten. Dabei wird der Schwerpunkt auf die Untersuchung der Verdunstung gelegt, da in unserem Klimagebiet etwa zwei Drittel des jährlichen Niederschlags durch Verdunstung in den natürlichen Wasserkreislauf zurück gelangen.

Im Einzelnen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie ändert sich die Verdunstung und damit verbunden der Energiehaushalt eines Gebietes durch die Landnutzungsänderungen infolge der Bebauung?
- Welche Maßnahmen können die Verdunstung in bebauten Gebieten erhöhen?
- Wie viel kann auf diese Weise erreicht werden?

Dabei ist es nicht das Ziel, in bebauten Gebieten die hohe Verdunstung natürlicher bewachsener Flächen wieder zu erreichen. Dies ist nicht möglich. Es soll jedoch aufgezeigt werden, wie unter Beibehaltung der für die Funktion der Städte erforderlichen Bebauung und Infrastruktur ein möglichst hoher Verdunstungsanteil erreicht werden kann und die standorttypische Wasser- und Energiebilanz nur so wenig wie unbedingt notwendig verändert wird.

Mit dem Begriff "natürliche Wasserbilanz eines Gebietes" wird in dieser Arbeit die Wasserbilanz eines unbebauten Gebietes ohne Versiegelung durch befestigte Flächen wie Straßen und Gebäude bezeichnet. Zu den natürlichen Gebieten werden Wälder, Wiesen, landwirtschaftlich genutzte Flächen und Gewässer gezählt. Dabei ist zu beachten, dass alle diese Flächen in unserer Kulturlandschaft im Laufe der Jahrhunderte durch die Tätigkeit der Menschen bereits stark verändert wurden und von ihrem ursprünglichen Zustand weit entfernt sind.

Die Untersuchung findet im Bereich der klimatologischen Mikroskala statt, wobei die horizontale Ausdehnung eines Untersuchungsgebietes bis zu einem Kilometer reicht. Bei dieser Größe kann die detaillierte Erfassung der Landnutzungsart und der Oberfläche für alle Teilflächen erfolgen.

Die Verdunstungshöhe hängt neben klimatischen Faktoren hauptsächlich von den Eigenschaften der Oberfläche ab. Die Unterteilung der Oberflächen nach Landnutzungsarten wird auf der Basis der europäischen Klassifikation für Landnutzungsdaten vorgenommen. Diese wird innerhalb bebauter Gebiete durch zusätzliche Nutzungsarten ergänzt, da hier eine genauere Unterscheidung erforderlich ist. Für alle Landnutzungsarten werden die hydrologischen und energetischen Eigenschaften erläutert und Verfahren zur Berechnung der mittleren langjährigen Wasser- und Energiebilanz vorgestellt. Der Vergleich der Bilanzen der Ausgangssituation und der geplanten oder ausgeführten Veränderungen ermöglicht die Einschätzung der langfristigen Auswirkungen der Bebauung auf den Wasser- und Energiehaushalt des Gebietes.

Ziel der Arbeit ist weiterhin die Orientierung auf die Nutzung solcher Ausgangsdaten, die für die meisten Gebiete vorliegen oder leicht zu beschaffen sind. Damit soll eine breite und einfache Anwendung in der Praxis ermöglicht werden. Aus dieser Überlegung heraus werden die Berechnungen mit langjährigen mittleren Klimadaten unter Verwendung des BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahrens durchgeführt. Dieses Verfahren wird für einige spezielle Oberflächen innerhalb bebauter Gebiete um eigene Ansätze erweitert. Die notwendigen langjährigen mittleren Klimadaten sind bundesweit frei verfügbar. Die weiteren erforderlichen Angaben zur Landnutzung sind für die Planung von Vorhaben ohnehin zu erfassen.

Die Erkenntnisse und Überlegungen werden an zwei unterschiedlichen Einzugsgebieten angewandt:

- Neubau eines Industrie- und Gewerbegebietes in Treuen (Vogtlandkreis, Sachsen) auf einer bisher land- und forstwirtschaftlich genutzten Fläche und
- Landnutzungsänderung im Zusammenhang mit dem Neubau eines unterirdischen Bahnhofes in der Innenstadt von Malmö (Region Skåne, Schweden).

Die Beispiele verdeutlichen, welche erheblichen Auswirkungen auf die Wasser- und Energiebilanz mit Landnutzungsänderungen verbunden sind. Für den teilweisen Ausgleich des Eingriffs in den Naturhaushalt werden Lösungen vorgestellt, deren Ansatzpunkt stets die Zwischenspeicherung des Niederschlagswassers für den im Vergleich zum Oberflächenabfluss langsamen Verdunstungsprozess ist. Am wirkungsvollsten sind dabei Dachbegrünungen, Wasserflächen und Bäume.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Verdunstungsprozess

Die Verdunstung des Wassers ist aus physikalischer Sicht eine unterhalb des Siedepunkts stattfindende Verdampfung, bei der Wasser vom flüssigen oder festen Zustand in den gasförmigen Zustand übergeht. Der Prozess findet nur an der Oberfläche von Körpern oder Flüssigkeiten statt. Für die Verdunstung wird Energie benötigt, die der Umgebung entzogen wird. Die Folge ist eine Abkühlung der Oberfläche („Verdunstungskälte“), da stets die Moleküle mit der größten Energie die Flüssigkeit verlassen [Baumgarten und Liebscher 1996]. Dabei wird die Wärmeenergie des Wassers in kinetische Energie des Wasserdampfes umgewandelt und abtransportiert.

Die Intensität der Verdunstung ist abhängig von:

- der zur Verfügung stehenden Energie,
- dem an der Oberfläche verfügbaren Wasser und
- dem Sättigungsdefizit der Luft.

Die Aufnahmefähigkeit und Verdunstungskraft der Atmosphäre wird durch das Sättigungsdefizit der Luft bestimmt. Das Sättigungsdefizit der Luft ist die Differenz zwischen dem aktuellen Dampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck. Der Dampfdruck ist von der Lufttemperatur abhängig. Der Sättigungsdampfdruck gibt den für die gegenwärtige Lufttemperatur maximal erreichbaren Dampfdruck an. Ein anderer Ausdruck für das Sättigungsdefizit ist die relative Luftfeuchtigkeit. Sie wird als Verhältnis von Sättigungsdampfdruck zum aktuellen Dampfdruck der Luft in Prozent angegeben.

Das Sättigungsdefizit charakterisiert das Verdunstungsvermögen der Luft. Selbst bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit ist das Verdunstungsvermögen der Luft noch höher als die Haltekräfte in den Boden-, Wasser- und Pflanzensystemen, so dass vorhandene Feuchtigkeit entzogen wird. Nach Baumgarten und Liebscher [1996] beträgt die Saugkraft der Luft bei 99 % relativer Luftfeuchtigkeit noch  $12 \text{ atm} = 12 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ .

Die Höhe des Sättigungsdefizits der Luft wird maßgeblich durch den Luftaustausch über der Verdunstungsfläche bestimmt. Wird neue trockene Luft herangeführt, bleibt das Sättigungsdefizit hoch und führt zu einer hohen Verdunstungsleistung. Bei fehlendem Luftaustausch reduziert sich das Sättigungsdefizit über der Oberfläche infolge des Übergangs der Wassermoleküle in die Luft und die Verdunstungsleistung nimmt ab. Hieraus ergibt sich der große Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Verdunstung.

Die Verdunstungshöhe wird zudem stark durch die laminare Grenzschicht unmittelbar über der Oberfläche bestimmt. Sie bildet sich bei fehlendem Wind oder fehlender Turbulenz. Die vertikale Ausdehnung dieser Schicht beträgt wenige Millimeter bis Zentimeter. In der laminaren Grenzschicht besteht nur ein geringes Konzentrationsgefälle der Luftfeuchtigkeit zwischen der Oberfläche und der umgebenden Luft. Der Wasserdampftransport ist damit stark eingeschränkt. Lediglich die molekulare Diffusion - die ungeordnete Bewegung der Moleküle infolge der Wärmebewegung der Teilchen - führt zu einer Durchmischung des Gases. Über der laminaren Grenzschicht erfolgt der Wasserdampftransport dann durch turbulente Luftbewegungen. Dieser, auch als turbulente Diffusion bezeichnete Prozess, ist nach Baumgarten und Liebscher [1996] um den Faktor 10 000 größer als die molekulare Diffusion.

Bei Windgeschwindigkeiten über 2 m/s wird die laminare Grenzschicht weitgehend beseitigt.

Die Umkehrung des Verdunstungsprozesses wird als Kondensation bezeichnet. Sie setzt ein, wenn die Temperatur den Taupunkt erreicht. Der Taupunkt ist die Temperatur, bei der der aktuelle Dampfdruck gleich dem Sättigungsdampfdruck ist. Erfolgt eine Abkühlung unter die Taupunkttemperatur, die stets kleiner oder höchstens gleich der Lufttemperatur ist, setzt beim Vorhandensein von Kristallisationskeimen die Kondensation des Dampfes zu Wassertropfen ein. Die Kondensation ist mit einer Erwärmung der Flüssigkeit verbunden, da die mittlere Temperatur der Moleküle im Wasserdampf höher ist als die der Moleküle im Wasser [Baumgarten und Liebscher 1996]. Verdunstung findet auch bei Temperaturen unter 0 °C über Eis oder Schnee statt, wenn die Temperatur über dem Taupunkt der Luft liegt.

Die Prozesse Verdunstung und Kondensation laufen immer gleichzeitig ab. Im molekularen Maßstab betrachtet, gehen bei ausreichender Energiezufuhr Wassermoleküle, die genügend Energie besitzen, um sich aus der Kohäsion der Flüssigkeit zu lösen, in die Luft über. Gleichzeitig werden andere Moleküle durch Zusammenstöße soweit abgebremst, dass sie in die Flüssigkeit zurückfallen. Ist das Sättigungsdefizit der Luft über der Oberfläche ausreichend groß, überwiegt der Prozess der Verdunstung über die Kondensation und es tritt eine Nettoverdunstung auf. Im umgekehrten Fall überwiegt die Nettokondensation.

## **2.2 Verdunstung im Naturhaushalt**

Im Naturhaushalt stellt die Verdunstung eine entscheidende Größe sowohl im Wasser- als auch im Energiekreislauf der Erde dar. Das Wasser verdunstet durch die Energieeinstrahlung der Sonne auf die Erde und die dadurch hervorgerufenen klimatischen Prozesse von der Oberfläche der Meere und Kontinente. Es wird als Wasserdampf durch atmosphärische Prozesse transportiert, kondensiert bei entsprechend geänderten Umgebungsbedingungen und fällt auf die Erde zurück.

Der größte Wasser- und Energieumsatz findet dabei über den Ozeanen statt, da sie zum einen etwa 70 % der Erdoberfläche einnehmen und zum anderen die Verdunstung nicht durch



fehlendes Wasser eingeschränkt wird. Die mittleren jährlichen Verdunstungshöhen der Ozeane und Kontinente sowie der vereinfachte globale Wasserkreislauf sind in Bild 2-1 und Bild 2-2 dargestellt.

Bild 2-2 zeigt, dass im globalen Maßstab etwa zwei Drittel der über den Landmassen fallenden Niederschläge vorher von den Landoberflächen verdunstet sind. Nur ein Drittel stammt aus der Verdunstung über den Meeren und wird von dort zu den Kontinenten transportiert. Dieser Anteil fließt im langjährigen Mittel ober- oder unterirdisch wieder in die Ozeane zurück.

Diese globalen Mittelwerte stimmen mit den Verhältnissen für das Territorium der Bundesrepublik Deutschland überein. Auch hier stammen im langjährigen Mittel zwei Drittel der Niederschläge aus der Verdunstung über den Landflächen und ein Drittel wird von den Meeren heran transportiert.

Ozeane	im Mittel	1 176 mm/a
	Maximum in den Randtropen mit 2 000 mm/a (etwas geringer in den zentralen Tropen infolge stärkerer Bewölkung)	
Kontinente	im Mittel	480 mm/a
	Subtropen	400 - 700 mm/a
	immerfeuchte Mittelbreiten	400 - 600 mm/a
	Tundrenzone	100 - 200 mm/a
	Eisschilde Antarktis und Grönland	10 - 25 mm/a

Bild 2-1 Mittlere jährliche Verdunstungshöhen der Ozeane und Kontinente [Ehrlicher 1991]

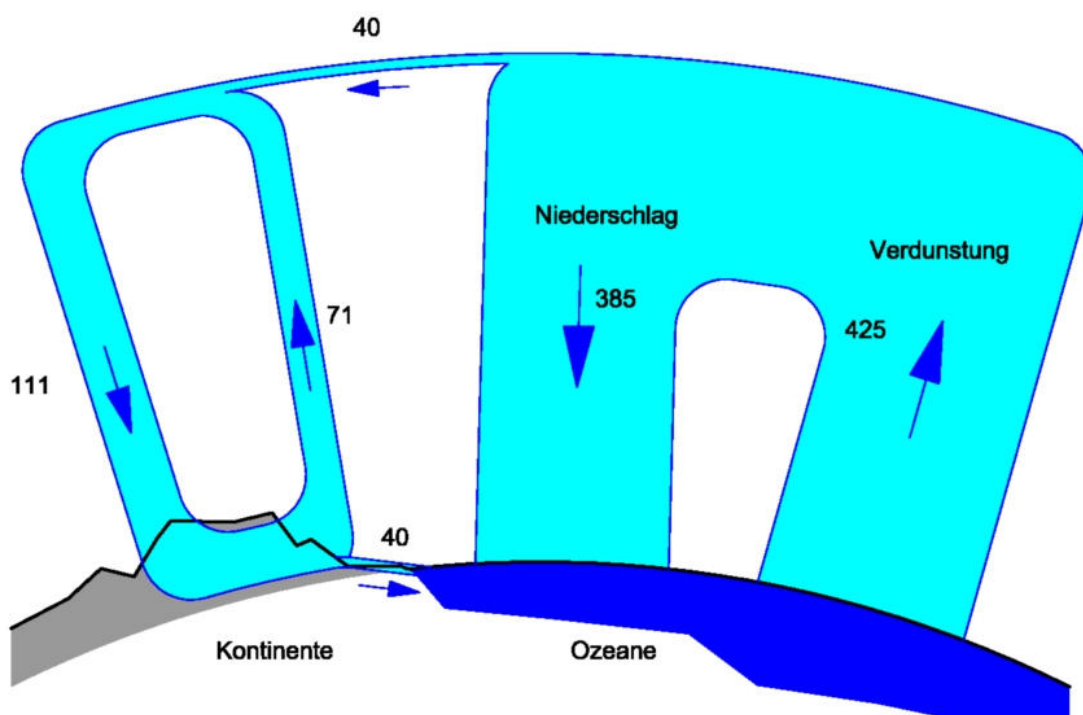


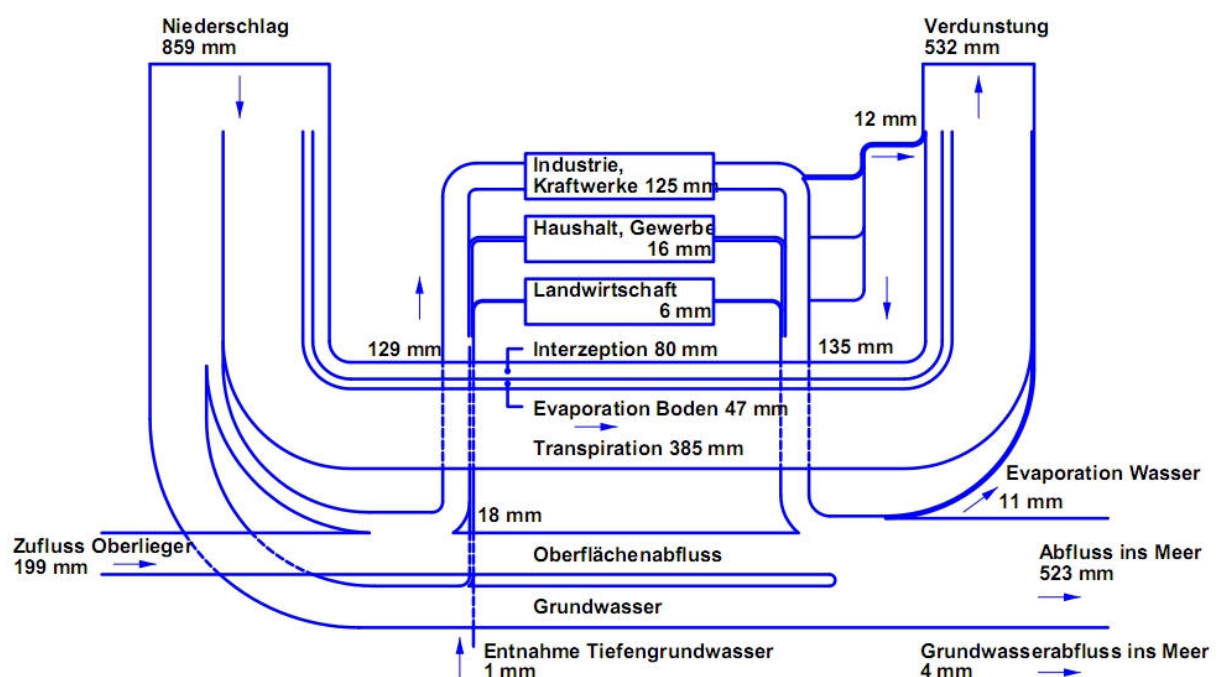
Bild 2-2 Vereinfachter globaler Wasserkreislauf, Werte aus Wetterbeobachtungen abgeleitet, Einheit 100 km³/a, nach Baumgartner und Reichel [1996]

Die vereinfachte Gleichung für den Wasserhaushalt lautet:

$$\text{Niederschlag} = \text{Verdunstung} + \text{Versickerung} + \text{Oberflächenabfluss} \pm \text{Speicheränderung}$$

Dabei ist der Niederschlag die unabhängige Eingabegröße. Verdunstung und Abfluss sind die davon abhängigen Ausgabegrößen. Die Speicheränderung stellt die Änderung des Wasservorrats im Bilanzzeitraum dar.

In Bild 2-3 ist die Wasserbilanz für das Territorium der Bundesrepublik Deutschland im langjährigen Mittel der Jahre 1961 bis 1990 dargestellt. In diesem Zeitraum beträgt der Anteil der Verdunstung an der zur Verfügung stehenden Niederschlagsmenge etwa 62 %.



**Bild 2-3** Wasserbilanz im Mittel der Jahre 1961 - 1990 für das Territorium der BRD in mm/a, Wasserbedarfsdaten für das Jahr 1990, verändert nach Baumgarten und Liebscher [1996] und Liebscher [1995]

Das für die Verdunstung zur Verfügung stehende Wasser stammt in der Natur aus

- Gewässern (Meere, Seen, Teiche, Fließgewässer),
- Niederschlagswasser, das nicht oberflächlich abgeflossen oder versickert ist, sondern sich am Boden in Unebenheiten und Mulden sammelt,
- Niederschlagswasser, das an den Oberflächen von Pflanzen und Gegenständen haftet,
- Wasser, das sich im Boden befindet, jedoch von den Pflanzen über die Wurzeln wieder aufgenommen und bis zu den Blattoberflächen transportiert werden kann,
- Wasser, das sich im Grundwasserleiter befindet und über den kapillaren Aufstieg wieder in den Bereich der Wurzelzone der Pflanzen gelangt sowie
- Wasser, das sich im Boden befindet und über den kapillaren Aufstieg die Oberfläche er-

reicht.

Die Verdunstung eines Gebietes wird als Evapotranspiration zusammengefasst. Sie besteht aus den Teilprozessen:

- Transpiration
- Interzeptionsverdunstung
- Evaporation

Transpiration ist die Aufnahme von Wasser durch die Pflanzen aus dem Boden und die Abgabe als Wasserdampf über die Pflanzenoberflächen an die Atmosphäre. Diese erfolgt zu 90 bis 95 % durch die Spaltöffnungen der Blätter (Stomata) und zu 5 bis 10 % durch die Blattoberfläche (Kutikula) [Merta 2001]. Die Abgabe über die Stomata kann von den Pflanzen durch Öffnen und Schließen der Stomata aktiv gesteuert werden. Dagegen ist die Transpiration über die Kutikula nur von den klimatischen Bedingungen abhängig.

Evaporation ist die nach physikalischen Gesetzen erfolgende Verdunstung des Wassers unmittelbar von Wasseroberflächen und unbewachsenem Boden. Dazu gehört auch die Verdunstung von befestigten Flächen wie Dächern, Straßen und Wegen.

Eine Form der Evaporation ist die Interzeptionsverdunstung. Dabei handelt es sich um die Verdunstung des Niederschlagswassers, das den Boden gar nicht erst erreicht, sondern an der Oberfläche von Pflanzenteilen haften bleibt. Aufgrund des großen Einflusses auf die Transpiration der Pflanzen wird dieser Vorgang als separater Teilprozess der Verdunstung bezeichnet. Der Einfluss beruht darauf, dass erst nachdem das Interzeptionswasser von den Pflanzenoberflächen verdunstet ist, die Transpiration der Pflanzen wieder einsetzt.

Die Verdunstung von Niederschlagswasser, das an den Oberflächen unbelebter Objekte (z.B. Gebäude oder Felsen) haftet, wird nicht als Interzeption verstanden.

In Bild 2-4 ist der Anteil der einzelnen Verdunstungsarten an der mittleren Jahresbilanz für das Gebiet der Bundesrepublik dargestellt [Schrödter 1985]. Die Bodenverdunstung erfolgt außer von vegetationslosen Böden und versiegelten Flächen auch von den Böden bewachsener Flächen. Letztere bringen den Hauptanteil der Bodenevaporation.

Transpiration der Pflanzen	72,6 %
Interzeptionsverdunstung an Pflanzen	16,0 %
Boden-Evaporation	9,2 %
Evaporation von Wasserflächen	2,2 %

*Bild 2-4*      Anteile der Verdunstungsarten an der Gesamtverdunstung in der mittleren Jahreswasserbilanz für das Gebiet der BRD nach Schrödter [1985]

Transpiration und Interzeptionsverdunstung stellen in unserem Klima mit fast 90 % den

Hauptteil der Verdunstung, da auf natürlichen Flächen im gemäßigten Klimagebiet fast immer eine Vegetation vorhanden ist. Ausnahmen sind zum Beispiel Felsen und durch Erosion neu gebildete Oberflächen bis zu deren Neubesiedlung. Beim Vorhandensein von Vegetation wird die Gesamtverdunstung wesentlich durch die Transpiration der Pflanzen beeinflusst.

### 2.3 Verdunstung in der Wasser- und Energiebilanz

Wasserkreislauf und Energiekreislauf der Erde sind durch die Verdunstung miteinander gekoppelt, da die Verdunstung des Wassers mit einer Energieaufnahme verbunden ist. Der bei der Verdunstung entstehende Wasserdampf transportiert die Energie in Form von Bewegungsenergie der Wassermoleküle in höhere Schichten der Atmosphäre. Diese Energie wird auch als „latente“ oder „versteckte“ Energie bezeichnet, da sie nicht zu einer Erhöhung der Lufttemperatur führt und somit für den Menschen nicht fühlbar ist. In einer Höhe zwischen 0,5 und 2 km (Peplosphäre) wird diese Energie während der Kondensation wieder frei gegeben und in das Weltall abgestrahlt. Der zu Tröpfchen kondensierte Wasserdampf fällt als Niederschlag zur Erdoberfläche zurück [Dyck und Peschke 1995].

Die Bilanzgleichungen für den Wasser- und Energiekreislauf der Erde sind in Bild 2-5 aufgeführt. Der Verdunstungsterm  $ET_a$  ist sowohl in der Bilanzgleichung des Wasserhaushalts als auch in der Bilanzgleichung des Energiehaushalts enthalten.

#### Kopplung von Wasser- und Energiekreislauf der Erde über den Verdunstungsterm der Bilanzgleichungen

Wasserbilanzgleichung

$$P + ET_a + R + \Delta S = 0$$

$P \dots$  Niederschlag [mm/a]

$ET_a \dots$  Tatsächliche Evapotranspiration [mm/a]

$R \dots$  Abfluss (Versickerung + Oberflächenabfluss) [mm/a]

$\Delta S \dots$  Speicheränderung [mm/a]

Energiebilanzgleichung

$$Rn + G + H + L \times ET_a = 0$$

$Rn \dots$  Nettostrahlung [W/m<sup>2</sup>]

$$Rn = R_G \times (1 - \alpha) - Rn_L$$

$R_G \dots$  Globalstrahlung [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha \dots$  Albedo [-]

$Rn_L \dots$  effektive langwellige Ausstrahlung = Differenz zwischen langwelliger (thermischer) Ausstrahlung der Erde und Gegenstrahlung der Atmosphäre [W/m<sup>2</sup>]

$G \dots$  Bodenwärmestrom [W/m<sup>2</sup>]

$H \dots$  Strom fühlbarer Wärme [W/m<sup>2</sup>]

$L \times ET_a \dots$  Strom latenter Wärme oder Verdunstungswärmestrom [W/m<sup>2</sup>]

$L \dots$  spezifische Verdampfungswärme von Wasser [kJ/kg]

Bild 2-5

Vereinfachte Form der Wasser- und Energiebilanzgleichungen

Wasser- und Energiekreislauf werden durch die Sonnenstrahlung angetrieben. Die von der Erde aufgenommene Sonnenenergie wird als kurz- und langwellige Strahlung und den Ver-

dunstungswärmestrom wieder an das Weltall abgegeben.

Die Eingangsgröße des Energiehaushalts der bodennahen Schichten ist die Nettostrahlung  $R_n$ . Das ist der Anteil der Sonnenstrahlung, der nicht bereits in der Atmosphäre und von der Oberfläche reflektiert oder von der Atmosphäre absorbiert wird. Von der insgesamt ankommenden kurzwelligen Sonnenstrahlung werden nach Dyck [1978] im Mittel etwa 30 % von den Wolken, der Atmosphäre und der Erdoberfläche reflektiert. Die verbleibende direkte und diffuse kurzwellige Energie erwärmt die Erdoberfläche und die Atmosphäre. 25 % der Energie werden von der Atmosphäre absorbiert, so dass als Nettostrahlung  $R_n$  an der Erdoberfläche 45 % der Globalstrahlung ankommen. Die von der Erde aufgenommene Energie wird durch den Wasser- und Energiekreislauf wieder an das Weltall abgegeben. Dies erfolgt zum einen als langwellige Wärmestrahlung durch direkte Abstrahlung der Erdoberfläche in den Weltraum (18 %) und indirekte Abstrahlung über die Erwärmung der Atmosphäre (4 %). Zum anderen wird der größte Teil der an der Erdoberfläche angekommenen Energie als latenter Wärmestrom (23 %) über die Verdunstung in die Atmosphäre transportiert und dort bei der Kondensation wieder frei. Bild 2-6 zeigt den vereinfachten globalen Energiekreislauf. Eingangsgröße ist hier die an der Obergrenze der Atmosphäre ankommende Globalstrahlung von  $1,3 \text{ kW/m}^2$ .

Nach Baumgarten und Liebscher [1996] besteht nur etwa 0,3 % der Masse der Atmosphäre aus Wasser. Trotzdem wird die Hälfte des irdischen Energiehaushalts durch das Wasser in der Atmosphäre bewältigt.

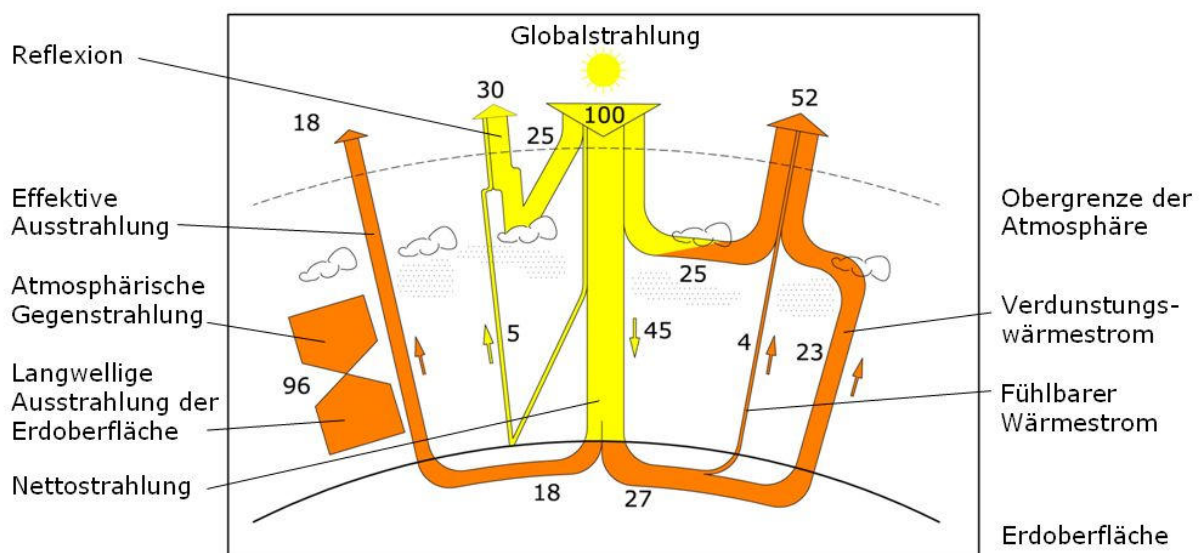


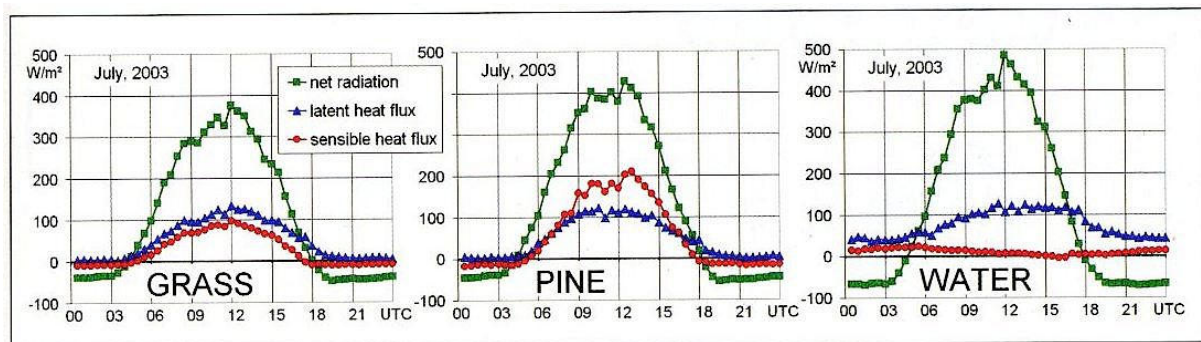
Bild 2-6 Vereinfachter Energiekreislauf der Erde, globale Jahresmittelwerte nach Baumgarten und Liebscher [1996] sowie Dyck und Peschke [1978], verändert

Die physikalische Größe, die Wasser- und Energiehaushalt verbindet, ist die spezifische Verdampfungswärme  $L$ . Sie gibt an, welche Energiemenge zur Verdunstung einer bestimmten Wassermenge benötigt wird. Die spezifische Verdampfungswärme  $L$  ist abhängig von der Temperatur und beträgt bei 10 °C 2 448 kJ/kg und bei 20 °C 2 454 kJ/kg [Baumgarten und Liebscher 1996].

$$L = 2501 - 2,37 \cdot T \quad \text{mit } T \geq 0 \text{ °C} \quad [\text{kJ/kg}]$$

Dargestellt als Verdunstungshöhe ist für die Verdunstung von 1 mm = 1 l/m<sup>2</sup> eine Energiemenge von rund 2 500 kJ erforderlich.

Im Jahresverlauf schwankt die Höhe der eingestrahnten Sonnenenergie aufgrund der Neigung der Erdoberfläche. Die Globalstrahlung ändert sich beispielsweise für einen Standort auf 51° nördlicher Breite im Bereich von 83 W/m<sup>2</sup> im Dezember bis zu 488 W/m<sup>2</sup> im Juni [Dyck und Peschke 1995]. Dabei wirkt sich die verfügbare Energie über die Intensität der Verdunstung auf den Wasserkreislauf aus, der dadurch einen damit gleich gehenden Jahresgang aufweist. Dies trifft auch für den Tagesgang der Verdunstung zu, der an Strahlungstagen dem Verlauf der eingestrahnten Sonnenenergie folgt. Bild 2-7 zeigt den mittleren Tagesgang der Strahlungskomponenten für unterschiedliche Landnutzungsarten.



**Bild 2-7** Mittlerer täglicher Verlauf der Nettostrahlung sowie des latenten und fühlbaren Wärmestroms im Juli 2003 für Gras, Kiefernwald und Wasser [Bernhofer et al. 2005]

Global gesehen ist der Verdunstungsprozess die Klimaanlage der Erde und verhindert die Überhitzung des Planeten. Eine Reduzierung der Verdunstung, zum Beispiel durch Versiegelung in bebauten Gebieten oder Trockenlegung von Feuchtgebieten, führt zu einer Temperaturerhöhung in den unteren Schichten der Atmosphäre. Gleichzeitig wird die Energieabstrahlung in das Weltall reduziert. In der Folge steht mehr Energie für die atmosphärischen Prozesse zur Verfügung. Die zunehmende Dynamik dieser Prozesse führt zur Verstärkung extremer Wetterlagen, wie Stürme, Starkniederschläge und Trockenperioden. Die globale Temperaturerhöhung ist verbunden mit einer Zunahme der potenziellen Verdunstung. Über den Meeren und anderen Wasserflächen steigt damit die tatsächliche Verdunstung an. Ob sie auch über Landflächen ansteigen kann, hängt jedoch von der Wasserverfügbarkeit ab. Da die Prognosen der Klimaentwicklung für Mitteleuropa von einer Abnahme der Sommerniederschläge und Zunahme von Starkniederschlägen bei einer etwa

gleich bleibenden Jahresniederschlagsmenge ausgehen, besteht sogar die Möglichkeit einer Abnahme der Wasserverfügbarkeit. Zuverlässige Aussagen zur Entwicklung der tatsächlichen Verdunstung über Landflächen sind deshalb gegenwärtig noch nicht möglich [Bernhofer 2006].

Die Kopplung des Wasser- und Energiehaushalts führt dazu, dass in bebauten Gebieten durch die Reduzierung der Verdunstung die eingestrahlte Energie nicht in der Menge wie bisher über den Verdunstungswärmestrom in höhere Schichten der Atmosphäre transportiert werden kann. Die verbleibende Energie bewirkt in den bebauten Gebieten einen Anstieg der Oberflächentemperaturen. Im Ergebnis der erhöhten langwelligen Ausstrahlung dieser Oberflächen steigt der Strom fühlbarer Wärme an. Das Verhältnis der Anteile von fühlbarem und latentem Wärmestrom wird in Richtung des fühlbaren Wärmestroms verschoben.

Jede Landnutzungsänderung, die mit einer Verringerung der Verdunstung verbunden ist, trägt somit zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten bei. Dies ist vor allem in urbanen Gebieten der Fall und zeigt sich besonders stark in den Sommermonaten, wenn die Wärmebelastung in den Städten bereits hoch ist.

In bebauten Gebieten kann die Verdunstung durch Wasser- und Grünflächen sowie begrünte Dächer zur Kühlung beitragen. Der Verdunstungsprozess kann folglich auch als „Klimaanlage“ für urbane Gebiete genutzt werden. Die Wirkung ist hierbei gerade dann am stärksten, wenn sie am meisten benötigt wird.

## 2.4 Einflussfaktoren auf die Verdunstung

Die Höhe der Verdunstung eines Standorts ist abhängig

- von der Wasser- und Energieverfügbarkeit,
- von den Bindungskräften der Wassermoleküle im Boden und in den Pflanzen,
- vom Verdunstungsvermögen der Luft und
- vom Abtransport der Wassermoleküle mit der Luftbewegung.

Diese physikalischen Prozesse werden durch klimatische, geologische und biologische Faktoren am jeweiligen Standort beeinflusst. Eine Übersicht der wichtigsten Einflussfaktoren enthält Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1 Übersicht der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Verdunstung

Einflussfaktoren auf die Verdunstung		
Klimatische Faktoren	Geologische Faktoren	Biologische Faktoren
Wirkung: Verfügbarkeit von Energie und Wasser	Wirkung: Bindungskräfte des Wassers an den Boden	Wirkung: Wasserbedarf der Pflanzen
Energieeinstrahlung	Bodenart	Pflanzenart
Temperatur	Korngröße	Wachstumsphase
Wind	Radius der Kapillaren	Bedeckungsgrad
Luftfeuchtigkeit	Hangneigung / Hangausrichtung	Wurzelausbildung

Die Verdunstungshöhe wird in Mitteleuropa in unbebauten Gebieten hauptsächlich von der zur Verfügung stehenden Energie und weniger vom verfügbaren Wasser bestimmt [Dörhöfer und Josopait 1980, Stecker 1997]. Das liegt daran, dass bei den hier vorherrschenden klimatischen Bedingungen (Sonnenscheindauer, Temperatur und Wind) die maximal mögliche Verdunstungshöhe an den meisten Standorten unter 600 mm/a und damit unter der mittleren Jahresniederschlagshöhe liegt. Die Niederschlagsmenge wirkt in der Bundesrepublik in unbebauten Gebieten erst dort als Begrenzung für die Verdunstung, wo die jährliche Niederschlagsmenge wie in der Lausitz oder östlich des Harzes deutlich unter 600 mm/a liegt. In bebauten Gebieten kann die Verdunstungshöhe jedoch erheblich vom Wasserangebot begrenzt werden, wenn das Wasser innerhalb kurzer Zeit in unterirdische Entwässerungsanlagen abfließt und für die Verdunstung nicht mehr zur Verfügung steht.



### Klimatische Faktoren

Die für den Prozess der Verdunstung am jeweiligen Standort verfügbare Energie- und Wassermenge wird von den klimatischen Bedingungen bestimmt. Die Verdunstung nimmt, solange Wasser vorhanden ist, mit steigender zur Verfügung stehender Energiemenge zu.

Die wichtigsten klimatischen Faktoren sind

- Strahlungsenergie
- Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für Wasserdampf (Sättigungsdefizit der Luft)
- Windverhältnisse am Standort

Physikalisch bedingt hängt die Intensität der Verdunstung von der Oberflächentemperatur ab. Diese wiederum wird durch die Sonnenstrahlung bestimmt, deren Höhe von der geographischen Lage und der Albedo der Oberfläche abhängig ist. Mit Albedo wird das Reflexionsvermögen der Oberfläche bezeichnet. Sie ist neben den Eigenschaften der Oberfläche auch vom Einfallswinkel der Sonne und dem Anteil diffuser Strahlung abhängig. Eine Albedo von 1 entspricht der vollständigen Reflexion. Die höchsten Albedowerte erreichen helle Flächen. Bei Neuschneeflächen beträgt die Albedo bis zu 0,95. Sehr niedrig sind dagegen die Werte für Wälder (0,05-0,20) und Meere (0,05-0,08). Die mittlere Albedo von landwirtschaftlichen Flächen liegt bei etwa 0,20 [Dyck und Peschke 1995]. Mit der Veränderung des Einfallswinkels der Sonne im Jahresverlauf ändert sich auch die Albedo der Oberflächen. In Tabelle 2-2 sind Mittelwerte für ausgewählte Oberflächen aufgeführt.

*Tabelle 2-2*      Mittlere Albedo von bewachsenen und unbewachsenen Flächen sowie Wasserflächen, zusammengestellt nach Dyck und Peschke [1995], UBA [2001] und Sukopp [1993]

Bewachsene Flächen		Unbewachsene Flächen		Wasserflächen	
Laubwald	0,15-0,20	Siedlungen	0,15-0,30	Wasser	0,06-0,12
Nadelwald	0,05-0,15	Dächer	0,10-0,35	Neuschnee	0,60-0,95
Sträucher	0,12-0,20	Straßen	0,05-0,20	Altschnee	0,30-0,60
Wiesen	0,16-0,26	dunkler Boden	0,05-0,25	Gletschereis	0,20-0,40
Ackerflächen	0,15-0,25	heller Boden	0,15-0,50	Weltmeere	0,05-0,08
Erdoberfläche insgesamt 0,14					

Die Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung führt zu Jahres- und Tagesganglinien der Verdunstung, die der Ganglinie der Sonnenstrahlung folgen und vom jeweiligen geographischen Standort abhängig sind. So werden in Europa in der Jahresganglinie die höchsten Verdunstungsraten infolge hoher Sonneneinstrahlung und Temperatur im Sommer und die niedrigsten im Winter erreicht. Die Tagesganglinie weist die größte Verdunstungsrate in den Mittags- und frühen Nachmittagsstunden aus. In absoluten Zahlen beträgt die durchschnittliche tägliche Verdunstungsmenge in den Sommermonaten 2 bis 3 mm/d und in den Wintermonaten 0,1 bis 0,3 mm/d [DWA 2002]. Als Mittelwert für das gesamte Jahr ergibt sich eine Verdunstungshöhe von 1,4 mm/d.

Der Jahresgang der potenzielle Verdunstung entspricht mit guter Näherung einer Sinuskurve (Bild 2-8). Ausgehend von der mittleren jährlichen Verdunstungshöhe lässt sich die mittlere tägliche potenzielle Verdunstung mit der folgenden Formel darstellen [Sieker et al. 2006]:

$$ET_0^d(i) = \frac{7}{9} \left[ \frac{2\pi}{365} \times (i - 91) + 1 \right] \times \frac{ET_0}{365}$$

mit  $ET_0^d(i)$  mittlere tägliche potenzielle Verdunstungshöhe [mm/d]

$i$  laufender Tag des Jahres (1. Januar:  $i = 1$ )

$ET_0$  mittlere jährliche potenzielle Verdunstung [mm/a]

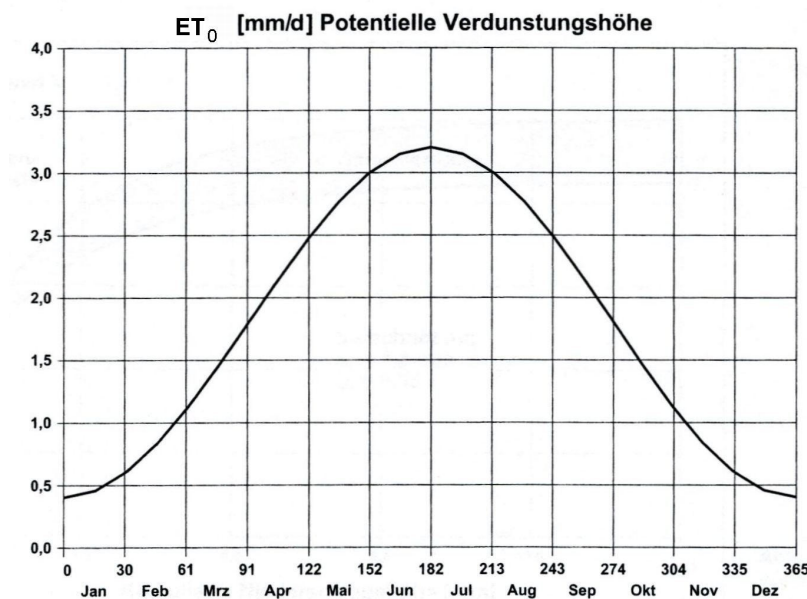


Bild 2-8 Mittlerer Jahresgang der täglichen potenziellen Verdunstungshöhe [Sieker et al. 2006]

Der ausgeprägte Jahresgang von Niederschlag, Temperatur und Verdunstung führt in Mitteleuropa zu unterschiedlichen hydrologischen Verhältnissen im Sommer- und Winterhalbjahr:

Sommerhalbjahr:

Niederschlag + Speicheraufbrauch = Verdunstung + Abfluss

Winterhalbjahr:

Niederschlag = Verdunstung + Abfluss + Speicherauffüllung

Im Winterhalbjahr wird die im Boden gespeicherte Wassermenge aufgefüllt, da aufgrund der geringen Sonneneinstrahlung die Verdunstung niedriger als die Niederschlagsmenge ist. Trotz weitaus höherer Niederschläge im Sommerhalbjahr ist die Verdunstung durch die intensive Transpiration der Pflanzen so hoch, dass der Bodenspeicher entleert werden kann und zusätzlich Wasser aus dem Grundwasser entnommen wird. In der langjährigen Bilanz füllt sich somit der Grundwasserspeicher in den Winterhalbjahren auf und wird in den Sommerhalbjahren geleert.

### Geologische Faktoren

Die geologischen Faktoren wirken über die Beeinflussung der Bindungskräfte des Wassers an den Boden. Dabei sind nur die obersten Dezimeter des Bodens entscheidend. Der auf den Boden eintreffende Niederschlag versickert in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens. Die Adhäsions- und Kohäsionskräfte in den Poren führen dazu, dass der Boden einen Teil des Wassers gegen die Wirkung der Schwerkraft zurückhalten kann.

Die Fähigkeit des Bodens, das Wasser zu binden, hat großen Einfluss auf die Verdunstung. Die maximale Wassermenge, die ein Boden aufnehmen kann, wird als Feldkapazität *FK* bezeichnet. Die Feldkapazität wird im Frühjahr nach der Schneeschmelze erreicht und sinkt im Laufe des Sommers trotz der zwischenzeitlichen Auffüllung durch Niederschläge kontinuierlich ab. Sie wird in Volumen-% angegeben und ist abhängig von der Bodenart und dabei insbesondere von der Korngröße und der Porengröße. Mit zunehmender Korngröße sinkt die erreichbare Feldkapazität. Sie ist damit bei sandigen Böden geringer als bei bindigen Böden. Das Wasser versickert dann schneller in tiefer liegende Schichten und steht für die Verdunstung nicht mehr zur Verfügung. Außerdem reduzieren sich die Kapillarkräfte mit steigender Porengröße und der daraus resultierenden Vergrößerung der Teilchenabstände.

Die zurückgehaltene Wassermenge ergibt die Bodenfeuchte. Dieses Wasser steht für die Verdunstung aus dem Boden und für die Transpiration der Pflanzen bei der Aufnahme über die Wurzeln zur Verfügung. Ohne neue Wasserzufuhr durch Niederschläge oder kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser sinkt die Bodenfeuchte durch Versickerung, Aufnahme durch die Pflanzenwurzeln und Evaporation ab. Die Bodenfeuchte, ab der die Pflanzen das verbliebene Wasser aus dem Boden nicht mehr aufnehmen können, da die Bindungskräfte zwischen Wasser und Boden zu hoch sind, wird als permanenter Welkepunkt *PWP* bezeichnet. Das für die Pflanzen aus dem Boden nutzbare Wasser ist die Differenz zwischen der Feldkapazität und dem permanenten Welkepunkt und wird als nutzbare Feldkapazität *nFK* bezeichnet.

Die nutzbare Feldkapazität ist für Schluff und schluffigen Sand am höchsten (21,0-25,5 %) und für Ton und reinen Sand am niedrigsten (14,5-15,5 %). Die Verdunstung von Flächen mit bindigen Böden ist im Vergleich zu Sandböden höher, da sowohl für die Evaporation des Wassers von der Bodenoberfläche als auch für die Aufnahme des Wassers aus dem Boden durch die Pflanzen mehr Wasser im Boden zurückgehalten werden kann. In Bild 2-9 ist für Sand-, Schluff- und Tonboden der Zusammenhang zwischen Bodenart, Bodenfeuchte und pflanzenverfügbarem Wasser grafisch dargestellt.

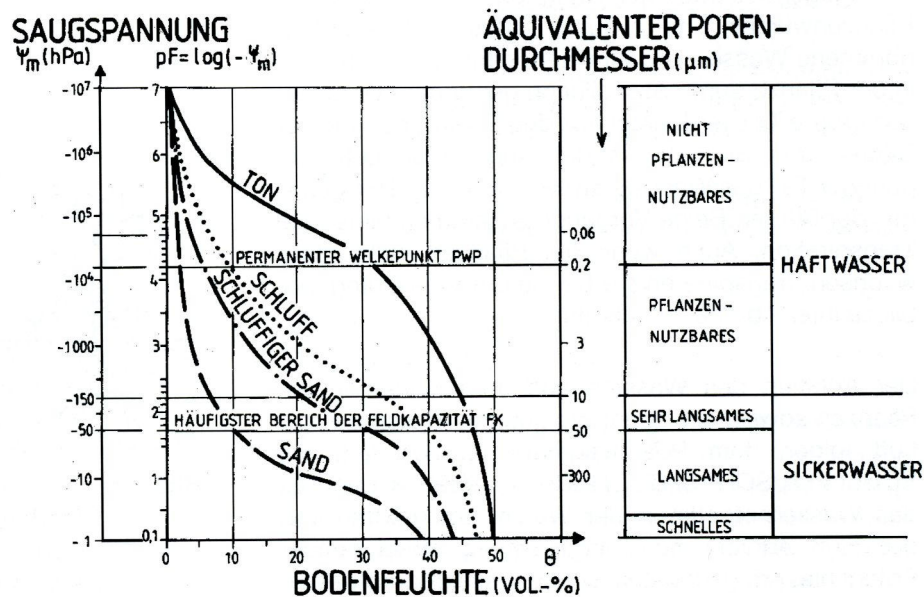


Bild 2-9 Abhängigkeit zwischen Bodenart und pflanzenverfügbarem Wasser für Sand, Schluff und Ton [DWA 1996]

In Abhängigkeit von der Bodenart und dem Grundwasserflurabstand ist ein erheblicher Wassernachschub durch kapillaren Aufstieg möglich. Der Grundwasserspiegel kann dabei 1,5 bis 2,5 m unter der Geländeoberkante liegen [Scheffer und Schachtschabel 1998]. Die für die Pflanzen verfügbare Wassermenge wird zusätzlich durch die Art und den Umfang der Wurzel Ausbildung bestimmt.

### Biologische Faktoren

Biologische Faktoren beeinflussen die Verdunstung über die Höhe der Transpiration und Interzeption. Die Verdunstungshöhe bewachsener Flächen ist dabei abhängig von der Pflanzenart, der Wachstumsphase und dem Bedeckungsgrad. In Bild 2-10 ist die Größenordnung der jährlichen Verdunstungshöhe für einige Pflanzenarten beispielhaft angegeben.

<u>Pflanzenart</u>	<u>mittlere Evapotranspirationsleistung [mm/a]</u>
Schwimmpflanzen	1000 - 1500
Hochstauden in Flussauen	800 - 1500
Sumpfpflanzen	~ 1100
Nadelwälder	500 - 700
Laubwälder	500 - 600
Grasflächen	400 - 500
Ackerflächen	300 - 400
Heideflächen	~ 200

Bild 2-10 Mittlere Evapotranspirationsleistung ausgewählter Pflanzenarten [Wohlrab et al. 1992, Larcher 2001, DWA 2002]

Die Verdunstung ist ein für die Pflanzen lebensnotwendiger Prozess. Der durch die Transpiration in den Blättern der Pflanzen ausgelöste Sog ermöglicht die Aufnahme von Nährstoffen aus dem Boden und die Transportprozesse innerhalb der Pflanzen.

Die Evapotranspiration der Pflanzen wurde und wird intensiv für eine Vielzahl von Arten un-

tersucht. Neben klimatologischen Untersuchungen erfolgen umfangreiche Forschungen in den Agrarwissenschaften. Sie werden mit dem Ziel durchgeführt, die Prozesse des Pflanzenwachstums und des Wasserverbrauchs zu optimieren [Larcher 2001, Merta 2000].

Die Pflanzenverdunstung wird unterteilt in Transpiration und Interzeptionsverdunstung. Während die Transpiration durch die Pflanzen aktiv über die Stomata gesteuert werden kann, ist die Interzeptionsverdunstung von den Pflanzen nicht beeinflussbar und hängt neben der Größe der Blattoberfläche hauptsächlich von der zur Verfügung stehenden Energie ab.

Die Transpiration wird durch die Differenz des Sättigungsdampfdrucks in der Luft und in den Blättern ausgelöst. Dabei liegt selbst bei hoher Luftfeuchtigkeit das Sättigungsdefizit der Luft über dem der Blätter, so dass eine Transpiration erfolgen kann. Diese findet zum weit überwiegenden Teil über die Blätter statt. Lediglich etwa 1 % der Jahrestranspiration wird nach Larcher [1994] über die Oberfläche der Äste und Stämme abgegeben.

Entscheidende pflanzenabhängige Faktoren für die Höhe der Evapotranspiration sind

- Pflanzenart und Bestandshöhe und davon abhängig die
- effektive Durchwurzelungstiefe und der
- Blattflächenindex.

Für die Berücksichtigung unterschiedlicher Pflanzenarten und deren jahreszeitliche Entwicklung ist in vielen Berechnungsverfahren ein Bestandsfaktor enthalten. Dieser erfasst den pflanzenspezifischen Bedeckungsgrad des Bodens und die Bestandshöhe. Durch Multiplikation mit einer Referenzverdunstung, zum Beispiel der Gras-Referenzverdunstung, wird die potenzielle Verdunstung des jeweiligen Pflanzenbestandes ermittelt. Ausführliche Angaben zu den Bestandsfaktoren und Blattflächenindizes verschiedener Pflanzen sowie deren jahreszeitliche Entwicklung sind beispielsweise in Disse [1995] und DWA [1996] aufgeführt.

Die effektive Durchwurzelungstiefe gibt die Tiefe an, aus der die Pflanzen über ihre Wurzeln etwa 90 % ihres Wasserbedarfs aufnehmen [DWA 2002]. Sie ist abhängig von der Pflanzenart und den Bodeneigenschaften. Entsprechend der Anpassung der Pflanzen an die Standortbedingungen werden unterschiedliche Wurzelarten ausgebildet. Pflanzen können zwar über die gesamte Oberfläche Wasser aufnehmen. Bei höher entwickelten Pflanzen erfolgt dies jedoch fast ausschließlich über die dafür spezialisierten Wurzeln. Niedere Pflanzen wie Moose, Flechten und Pilze saugen das Wasser kapillar aus feuchten Untergründen und nach der Benetzung mit Regen oder Tau auf. Das Wurzelsystem der höheren Pflanzen ist artspezifisch an die jeweiligen Standortbedingungen angepasst. Unterschieden werden oberflächennahe, tiefgründige und stockwerkartige Wurzelsysteme [Larcher 1994]. Intensiv-Wurzler, wie Gräser und Palmen, bilden stark verfilzte Wurzeln mit vergleichsweise geringer räumlicher Ausdehnung. Extensiv-Wurzler, wie Kiefern und Kakteen, entwickeln weit ausge-

breitete Wurzeln und können damit auch tiefer oder weiter entferntes Wasser aus dem Boden entnehmen. Das Saugpotenzial, das die Pflanzen an den Wurzeln ausbilden, kann das Wasser nur aus der unmittelbaren Umgebung der Wurzelenden (einige mm bis cm) aufnehmen. Das Wasser muss dann in diesen Bereich wieder nachfließen.

Mit Hilfe des Blattflächenindex (Summe der Blattflächen geteilt durch die Grundfläche, die diese Pflanze überdeckt) können die Größe der Interzeption und teilweise der Einfluss des Windes erfasst werden. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den Abtransport des Wasserdampfes und damit auf die Verdunstungsleistung ist bei Pflanzen besonders ausgeprägt, da sich durch die gegenseitige Abschirmung an geschützten Blättern eine stärkere laminare Grenzschicht bilden kann. Die Verdunstung in diesen Bereichen wird deutlich reduziert [Larcher 2001].

Die Wachstumsphasen der Vegetation wirken sich auf die Verdunstung durch den Jahreszyklus der Pflanzen und durch das Alter aus. Das Alter eines Pflanzenbestandes hat besonders bei Bäumen großen Einfluss auf die Verdunstungsmenge.

Aus dem jährlichen Wachstumszyklus der Pflanzen ergibt sich, dass die Verdunstung in den Sommermonaten bei vollständiger Blattausbildung am größten ist. Tageswerte der Verdunstung können bei voll entwickelten landwirtschaftlichen Beständen und bei sehr guter Wasserversorgung, zum Beispiel nach Regenfällen, im Sommer bis zu 11 mm/d betragen [DWA 2002:22]. Der Jahresgang der Verdunstung ist in Bild 2-11 für ausgewählte Pflanzenarten und Böden anhand von mittleren Monatswerten dargestellt.

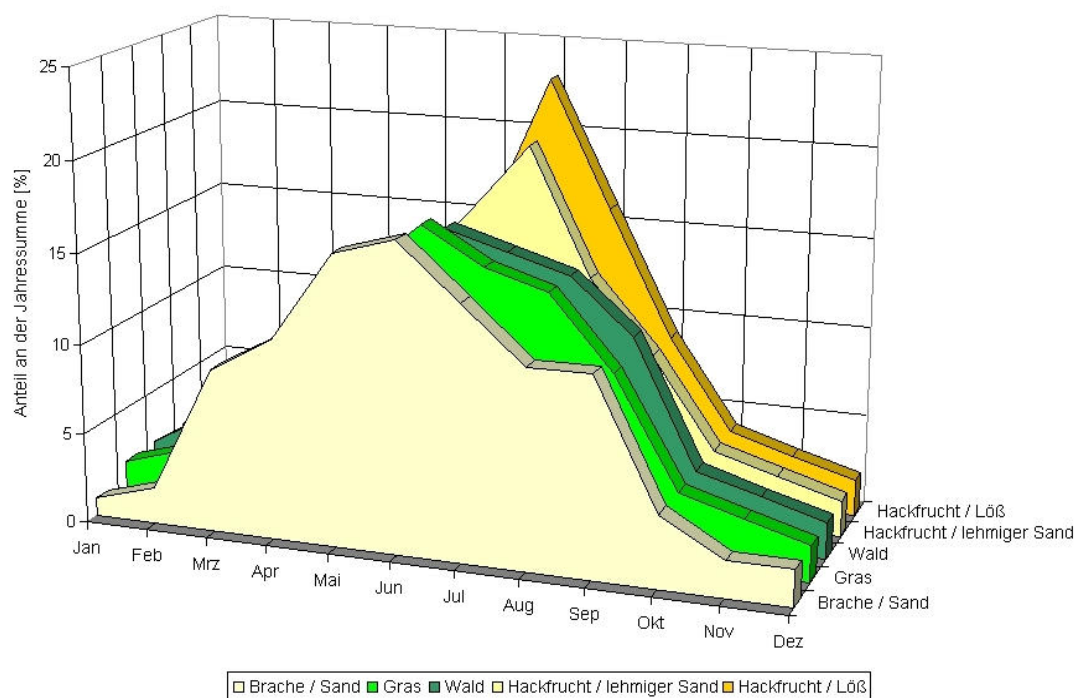


Bild 2-11

Jahresgang der Verdunstung für ausgewählte Pflanzenarten und Böden, Werte aus DWA M238 [1996] Tafel 6.6

## 2.5 Ermittlung der Verdunstungshöhe

### 2.5.1 Mess- und Berechnungsverfahren

Aufgrund der großen Bedeutung der Verdunstung für die klimatischen Prozesse und das Pflanzenwachstum werden seit langem umfangreiche Forschungen zur qualitativen und quantitativen Beschreibung der dabei ablaufenden Vorgänge betrieben. Exakte Messungen sind nur punktuell möglich. Das Problem der Übertragung dieser Messergebnisse auf die Ermittlung der Verdunstungshöhe von Flächen ist noch nicht ausreichend gelöst.

Die Schwierigkeiten für die exakte Nachbildung der natürlichen Prozesse des Wasserhaushalts entstehen durch:

- die große zeitliche und räumliche Veränderlichkeit der hydrologischen Parameter in Atmosphäre, Biosphäre und Hydrosphäre,
- die großen Unterschiede der Verdunstungseigenschaften von Boden, Vegetation und versiegelten Flächen,
- Probleme bei der Übertragung der punktuellen Messungen in Parameter, die für räumliche Einzugsgebiete gültig sind, und
- die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den Einflussfaktoren.

Die Bestimmung der Verdunstung über Wasserflächen ist dank der im Gegensatz zu bewachsenen Flächen vergleichsweise homogenen Oberfläche am genauesten möglich. Für exakte Ergebnisse ist jedoch auch hier ein sehr hoher Messaufwand erforderlich. Die Verdunstung bewachsener Gebiete ist aufgrund der Vielzahl der Einflüsse durch Art, Entwicklungsphase und Größe der Pflanzen sowie deren Wechselwirkungen mit der Atmosphäre und dem Boden am schwierigsten zu quantifizieren.

In der Literatur wird eine Vielzahl von Methoden und Wasserhaushaltsverfahren für die Ermittlung der Verdunstung aufgeführt. Zusammenfassende Angaben zu den am häufigsten angewandten Verfahren sind unter anderem in den DWA Merkblättern M238 „Verdunstung von Land- und Wasserflächen“ [DWA 1996] und M504 „Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden“ [DWA 2002] sowie in Disse [1995] und Vietinghoff [2000] enthalten.

Grundsätzlich lassen sich die Verfahren zur Bestimmung der Verdunstung unterteilen in

- direkte Messverfahren (z.B. Verdunstungsgefäße, Lysimeter, Eddy-Kovarianz-Energiebilanz-Methode)
- indirekte Messverfahren (Messung von Wasser- und Energiebilanzgrößen)
- Berechnungsverfahren

Die direkten Messungen basieren auf folgenden Methoden:

- Messung des Verdunstungsanspruchs der Atmosphäre mittels Messgeräten mit feuchten Oberflächen oder feuchten Körpern (Atmometer, Evaporometer)
- Messung der Verdunstungsmenge von offenen Wasserbehältern, die an Land oder im Wasser aufgestellt sind (Evaporimeter, Verdunstungskessel)
- Messung der Verdunstung von Bodenkörpern mit Lysimeteranlagen
- Messung der Änderung des Wassergehalts im Boden infolge der Verdunstung
- Pflanzenphysiologische Messungen
- Mikrometeorologische Messungen (Eddy-Kovarianz-Energiebilanz-Methode)

Die direkte Messung der Verdunstung ist nur punktuell möglich und für exakte Ergebnisse mit hohem Aufwand verbunden. Die genauesten Ergebnisse werden dabei mit mikrometeorologischen Messungen nach der Fluktuationsmethode erreicht. Das auch als Eddy-Kovarianz-Energiebilanz-Methode bezeichnete Verfahren beruht auf der Messung des vertikalen Wasserdampfstroms durch eine zeitlich hoch aufgelöste Erfassung (bis 10 Hz) der Änderung des vertikalen Luftstroms, der Luftdichte und der Luftfeuchte [DWA 1996]. Aufgrund der bei dieser Methode sehr hohen Anforderungen an den Geräteaufwand und die Genauigkeit ist der Einsatz nur für Forschungsvorhaben zur weitergehenden Untersuchungen zum genaueren Verständnis der Verdunstungsprozesse geeignet.

Lysimeter ermöglichen mit guter Näherung die Ermittlung der Verdunstung über lange Zeiträume und für unterschiedliche Landnutzung auf der Grundlage der Erfassung des Bodenwasserhaushalts. Die Verdunstung wird dabei als Restglied aus der Differenz von Niederschlag minus Versickerung, Oberflächenabfluss und Bodenwasservorratsänderung ermittelt. Auch hier ist ein hoher Aufwand erforderlich, so dass diese Messungen auf wenige langjährige Versuchsstationen beschränkt sind.

Bei pflanzenphysiologischen Messungen wird die Transpiration der Pflanzen direkt ermittelt. Diese stellt bei bewachsenen Flächen den Hauptanteil der Evapotranspiration dar und erlaubt daher ausreichend genaue Rückschlüsse auf die gesamte Verdunstung. Die Verfahren umfassen die Messung des Gasaustauschs unmittelbar an den Blättern und der Durchflüsse im Stamm oder den Stängeln. Ausführliche Beschreibungen und Untersuchungen zu diesen Messungen sind beispielsweise in Merta [2001] enthalten.

Die indirekten Verfahren basieren hauptsächlich auf:

- Messung von Energiebilanzgrößen
- Messung der Transportprozesse und der Eigenschaften der bodennahen Atmosphäre.

Die zu messenden Energiebilanzgrößen umfassen je nach Rechenmodell die Strahlungsbi-



lanz, den Bodenwärmestrom und den fühlbaren Wärmestrom. Dazu werden der Wasserdampfgehalt, die Temperatur und die Luftbewegung in unterschiedlichen Höhen gemessen (Gradientenverfahren). Die größten Ungenauigkeiten entstehen dabei während der Erfassung der turbulenten Luftbewegung und der Messung der oft sehr geringen Änderungen des Wasserdampfgehalts.

Die Berechnungsverfahren basieren auf den mithilfe der direkten und indirekten Messverfahren gewonnenen Erkenntnissen. Abhängig vom Ansatz und den angewandten Ausgangsgrößen existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Rechenmodelle, die in physikalisch basierte, konzeptionelle und Blockmodelle unterschieden werden können [DWA 1982]. Physikalisch basierte Modelle stellen die hydrologischen Prozesse auf der Grundlage der naturwissenschaftlichen Gesetze dar. Konzeptionelle Modelle beziehen sich nur noch in vereinfachter Näherung auf die naturwissenschaftlichen Gesetze und arbeiten im Weiteren mit empirischen Ansätzen. In einer nochmaligen Vereinfachung wird bei den Blockmodellen vollständig von empirischen Ansätzen, die die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Eingangsdaten und Ausgabedaten berücksichtigen, ausgegangen. Der Vorteil der Blockmodelle und der konzeptionellen Modelle liegt in einer niedrigen Anzahl von Ausgangsparametern und einem daraus resultierenden geringen Aufwand für die Datenbeschaffung. Damit ist gleichzeitig der Nachteil verbunden, dass die unterschiedlichen Standortbedingungen nicht differenziert genug berücksichtigt werden können.

Die an hydrologische Modelle zu stellenden Anforderungen werden von den physikalisch basierten Modellen am besten erfüllt [DWA 1999]. Die Blockmodelle und konzeptionellen Modelle haben weiterhin für die Praxis eine große Bedeutung. Ursachen dafür sind der bereits genannte hohe Aufwand für die Beschaffung der für die physikalisch basierten Modelle notwendigen Daten und die trotzdem noch hohen Ungenauigkeiten der Ergebnisse.

Mit dem Leistungszuwachs der Rechentechnik im letzten Jahrzehnt wurden besonders die physikalisch basierten Modelle neu- und weiterentwickelt. Sie erfordern einen erheblich höheren Aufwand für die Bereitstellung der notwendigen Daten. Der Vorteil der physikalisch basierten Modelle besteht in der Möglichkeit, die räumliche und zeitliche Variabilität des Wasserhaushalts für unterschiedliche Teilflächen in einem Einzugsgebiet detailliert darzustellen. Die Genauigkeit dieser Modelle wurde noch vor wenigen Jahren durch die begrenzte Rechenleistung der allgemein zu Verfügung stehenden Datenverarbeitungsanlagen eingeschränkt. Diese Begrenzung ist inzwischen weggefallen. Heute ist der begrenzende Faktor der erforderliche Aufwand für die Beschaffung der für eine hohe Genauigkeit benötigten großen Datenmengen.

In den letzten Jahren konnte durch geografische Informationssysteme und Fernerkundungsverfahren die Detailtiefe hinsichtlich der Flächenauflösung deutlich erhöht werden. Damit

verbunden ist ein bedeutender Mehraufwand für die Datenbeschaffung. Trotz dieser Entwicklung sind die Ergebnisse nach einer Analyse der Bundesanstalt für Gewässerkunde nicht wesentlich besser geworden [Diersch et al. 2001:162]. Die Modelle sind immer noch eine zu sehr vereinfachte Nachbildung der in der Natur ablaufenden komplexen Prozesse. Sydow et al. [1996] kommen nach der Bewertung verbreiteter Modelle zum Resultat, dass die besten Ergebnisse bei der Modellierung von Einzugsgebieten mit physikalisch basierten Modellen erreicht werden.

Für die meisten praktischen Anwendungen ist der Einsatz physikalisch begründeter Modelle durch den dabei erforderlichen sehr hohen Messaufwand zu aufwändig. Da auch bei diesen Verfahren trotz des hohen Mess- und Rechenaufwandes mit großen Unsicherheiten zu rechnen ist, sind die Ergebnisse der empirischen Verfahren in den meisten praktischen Anwendungen ausreichend [Merz 1996].

## **2.5.2 Jahresbilanz als Gradmesser der langfristigen Auswirkungen**

Der Zeithorizont hydrologischer Betrachtungen reicht von kurzfristigen Zeiträumen, die sich mit einzelnen Niederschlagsereignissen befassen, bis zu langfristigen Untersuchungen mit dem Ergebnis langjähriger mittlerer Jahresbilanzen.

Im Stadtbauwesen wird den Starkniederschlagsereignissen besondere Aufmerksamkeit zuteil. Anhand von Niederschlagsereignissen, die mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 1x in 2, 5 oder 10 Jahren auftreten, wird der Spitzenabfluss aus einem Gebiet ermittelt. Die Abflussmenge dient als Vorgabe für die Bemessung der Entwässerungsanlagen und ergibt die maßgebende maximale Belastung des Vorfluters.

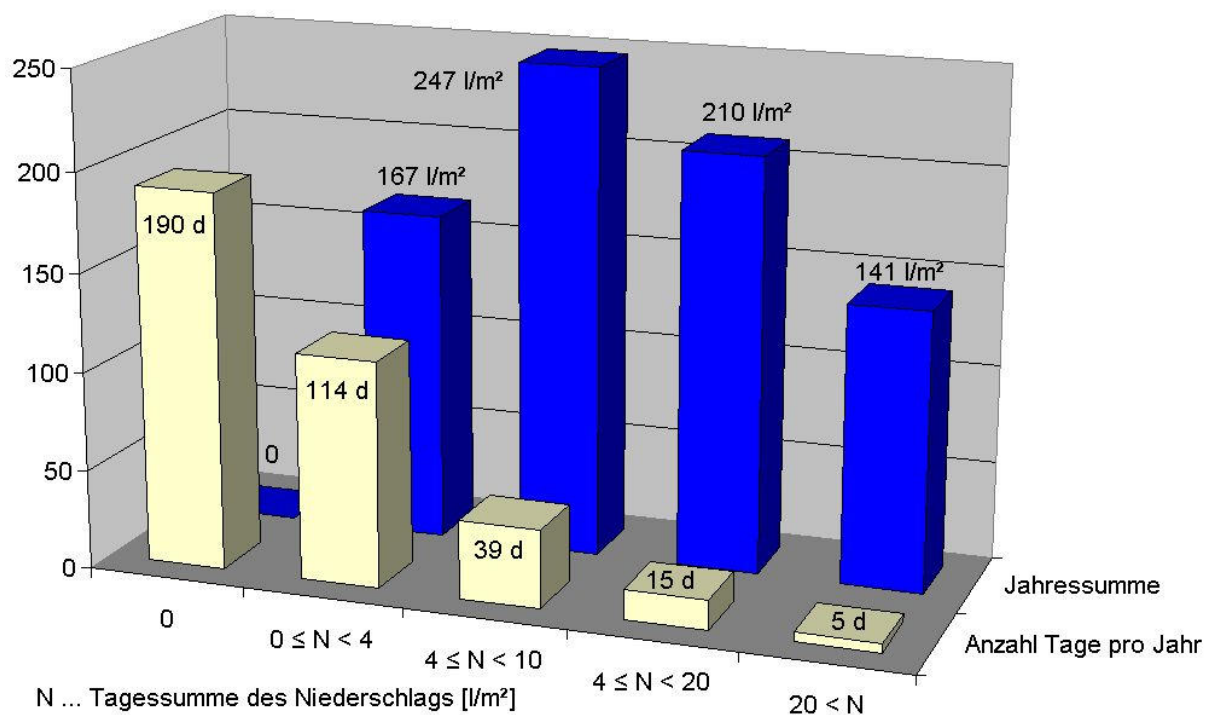
Wenig beachtet wurde dagegen bisher die Jahreswasserbilanz eines Einzugsgebietes. Die Änderungen in der Jahresbilanz infolge von Landnutzungsänderungen zeigen jedoch die Langzeitwirkung auf den Naturhaushalt und charakterisieren damit den Umfang des Eingriffs in den Naturhaushalt infolge der Bebauung.

Die Eingriffe des Menschen in den Naturhaushalt werden mit der Zunahme des Gesamtumfangs immer spürbarer. Der nachgewiesene Klimawandel durch die globale Erwärmung ist ein deutliches Zeichen. Bei allen baulichen Aktivitäten sollten deshalb auch die langfristigen Auswirkungen berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass eine Bemessung anhand von Starkregenereignissen, die nur 1x in 2, 5, 10 Jahren oder seltener auftreten, nicht aussagekräftig für die Einschätzung der langfristigen Entwicklung sein kann. Entscheidend sind die Auswirkungen baulicher Anlagen auf die mittlere Jahresbilanz eines Gebietes. Darin werden nicht nur Starkregenereignisse, sondern auch alle Niederschläge mit geringer Intensität berücksichtigt. Erforderlich ist eine Bemessung, die beide Aspekte umfasst: Bemessung der baulichen Anlagen über Starkregenereignisse einerseits und Aufzeigen der langfristigen Auswirkungen über die mittlere jährliche Wasserbilanz andererseits.

Die Analyse der Tagessummen der Niederschläge zeigt, dass die meisten Niederschläge von geringer Intensität sind. In Bild 2-12 sind die durchschnittliche Anzahl der Tage nach der Tagessumme des Niederschlags und die an diesen Tagen in der Jahressumme gefallenen Niederschlagsmengen am Beispiel der 30-jährigen Regenreihe der Station Eich im sächsischen Mittelgebirge grafisch dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass an etwa 66 % aller Tage mit Niederschlag die Tagessumme unter  $4 \text{ l/m}^2$  liegt. Bei Niederschlagssummen bis  $4 \text{ l/m}^2$  tritt selbst von vielen versiegelten Flächen durch das an den Oberflächen haftende Wasser und den Muldenrückhalt kein Oberflächenabfluss auf. Diese Niederschlagsereignisse haben einen Anteil am Jahresniederschlag von 22 %.

Starkniederschläge mit einer Tagessumme  $>20 \text{ l/m}^2$  traten an durchschnittlich nur 5 Tagen im Jahr auf. Der dabei gefallene Niederschlag erreicht jedoch etwa 18 % des Jahresniederschlags.

Nach Münchow [1999:72] haben Niederschläge mit einer Regenspende von 5 bis  $80 \text{ l/(s} \times \text{ha)}$  einen Anteil von etwa 94 % am Jahresniederschlag.



**Bild 2-12** Tagessummen des Niederschlags nach der Anzahl der Tage pro Jahr und der Jahressumme am Beispiel der Station Eich (Vogtlandkreis, Sachsen)

Bild 2-12 verdeutlicht, dass die Stadtentwässerungsanlagen in der Größe, die sich aus dem Bemessungsregen ergibt, nur wenige Stunden im Jahr ausgelastet sind. Die Verringerung der Spitzenabflussmengen durch Zwischenspeicherung des Oberflächenwassers, Verringerung der Versiegelung und weitere Abkopplungsmaßnahmen schafft ein hohes Einsparpotenzial an Investitionsmitteln für neu zu erschließende Gebiete. In bestehenden Entwässerungssystemen könnte dadurch die Überlastungshäufigkeit und damit auch der Schadstoffeintrag in die Vorflut verringert werden.

In der vorliegenden Arbeit werden aufgrund dieser Überlegungen im Weiteren Jahresmittelwerte für die Beschreibung der hydrologischen Eigenschaften der Oberflächen genutzt.

### 2.5.3 Ermittlung der Verdunstung von Landflächen

#### Potenzielle und tatsächliche Verdunstung

Die Verdunstung über Landflächen wird bei den meisten Modellen in zwei Stufen bestimmt, wobei im 1. Schritt die potenzielle Verdunstung und im 2. Schritt die tatsächliche Verdunstung ermittelt wird.

Die potenzielle Verdunstung ist die unter den gegebenen meteorologischen Bedingungen des Standorts bei unbegrenzter Wasserverfügbarkeit maximal mögliche Verdunstung [DIN4094-3]. Diese kann bei Landflächen durch Verdunstungswiderstände und Perioden mit Wassermangel nicht immer voll ausgeschöpft werden. Zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung ist deshalb zu erfassen, wie weit die potenzielle Verdunstung am jeweiligen Standort unter den von der Landnutzung und dem verfügbaren Wasser abhängigen Bedingungen ausgeschöpft werden kann. Die potenzielle Verdunstung stellt die Basis für die Bestimmung der tatsächlichen Verdunstung dar.

Der Begriff der potenziellen Verdunstung wurde in der Vergangenheit unterschiedlich definiert. Meist wurde damit die Obergrenze der Verdunstung bezeichnet. Um die damit verbundenen Missverständnisse zu vermeiden, wurde als einheitliche Basis für die verschiedenen Berechnungsverfahren auf Empfehlung der FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) die „Gras-Referenzverdunstung“  $ET_0$  eingeführt [Allen et al. 1994].

#### Potenzielle Verdunstung als Gras-Referenzverdunstung $ET_0$

Die Gras-Referenzverdunstung  $ET_0$  kann nach dem physikalisch basierten Penman-Monteith-Verfahren aus allgemein verfügbaren täglichen Klimadaten errechnet werden. Die Berechnungsgleichung für Tageswerte lautet [DWA 2002]:

$$ET_0 = \frac{s \times Rn^*}{s + \gamma^*} + \frac{90 \times \gamma}{s + \gamma^*} \times v_{2m} \times \frac{e_s(T)}{T + 273} \left( 1 - \frac{U}{100} \right)$$

mit	$ET_0$	Gras-Referenzverdunstung [mm/d]
	$s$	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa/K]
	$Rn^*$	Verdunstungsäquivalent der Nettostrahlung [mm/d]
	$\gamma$	Psychrometerkonstante $\gamma = 0,65$ hPa/K
	$\gamma^*$	modifizierte Psychrometerkonstante $\gamma^* = \gamma(1 + 0,34 \times v_{2m})$
	$e_s(T)$	Sättigungsdampfdruck für die Lufttemperatur [hPa]
	$T$	Temperatur [°C]
	$U$	Luftfeuchtigkeit [%]
	$v_{2m}$	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m/s]

Die Gras-Referenzverdunstung  $ET_0$  ist definiert als die bei einem unbegrenzten Wasserangebot für einen geografischen Standort zu einem bestimmten Zeitpunkt maximal mögliche Verdunstung einer standardisierten Grasfläche. Mit der Formel kann die Verdunstung eines standardisierten 12 cm hohen Grasbestandes mit einem aerodynamischen Verdunstungswiderstand von 208 s/m, einem Bedeckungsgrad von 1, einer Albedo von 0,23 und einem Mindest-Stomatawiderstand von 70 s/m ermittelt werden.

Eine vereinfachte Gleichung zur Bestimmung der Gras-Referenzverdunstung aus Klimadaten der Normalperiode 1961 - 1990 wird von Wendling vorgeschlagen [DWA 2002]. Das Ergebnis sind mittlere Monatssummen:

$$ET_0^* = \frac{s}{s + \gamma} \left( 0,65 \frac{R_G}{L} + 0,25 \times n_M \times k \right) \frac{1}{1 + 0,00019 \times h}$$

mit	$ET_0^*$	vereinfachte Gras-Referenzverdunstung [mm/mon]
	$s$	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa/K]
	$R_G$	Globalstrahlung [W/m²]
	$n_M$	Anzahl der Tage im Monat
	$k$	Küstenfaktor für bis 50 km von der Küste entfernte Bereiche
	$h$	Stationshöhe (für NN > 600: $h = 600$ m ü.NN) [m ü.NN]

Die Berechnung der Verdunstung mit diesen definierten Randbedingungen erfasst den Klimaeinfluss am jeweiligen Standort. Die Gras-Referenzverdunstung ermöglicht bei der Einbeziehung davon abweichender Standortbedingungen die Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung. Gleichzeitig ist ein Vergleich der Verdunstungshöhen verschiedener Standorte und Standortbedingungen möglich. Die Gras-Referenzverdunstung hat sich in den letzten zehn Jahren international als Standardgröße durchgesetzt. Sie wird auch im Weiteren in dieser Arbeit verwendet.

Die Gras-Referenzverdunstung stellt keine Obergrenze wie die potenzielle Verdunstung am Standort dar. Je nach Landnutzung kann die tatsächliche Verdunstung größer oder kleiner als die Gras-Referenzverdunstung sein.

### **Tatsächliche Verdunstung**

Für die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung wurde eine Vielzahl von Ansätzen entwickelt. Erkennbar sind dabei zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze, zum einen die Berücksichtigung der Standortverhältnisse durch die Erfassung zusätzlicher Daten und zum anderen die Zusammenfassung aller Standortbedingungen in einem Korrekturfaktor.

Beim ersten Ansatz werden zusätzliche Angaben zu den Bodenverhältnissen und den Eigenschaften der Landnutzung benötigt. Ein Beispiel dafür ist das Widerstandskonzept, dass

von Monteith begründet wurde. Dabei werden die Windverhältnisse und die räumlichen Eigenschaften des Bewuchses mit der Einführung eines aerodynamischen Verdunstungswiderstandes erfasst. Die Berücksichtigung der pflanzenspezifischen Wasserversorgung erfolgt mit einem weiteren Verdunstungswiderstand - dem Stomatawiderstand.

Auf diesem Ansatz basieren auch die Verfahren, die mithilfe der Gras-Referenzverdunstung unter Berücksichtigung der Standortverhältnisse die tatsächliche Verdunstung bestimmen. Dazu gehört das BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren, das im folgenden Kapitel ausführlich erläutert wird und für die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kommt.

Beim zweiten Ansatz wird die tatsächliche Verdunstung über einen oder mehrere Korrekturfaktoren zur potenziellen Verdunstung ermittelt. Diese Faktoren fassen alle für die Verdunstung relevanten Einflüsse am Standort zusammen. Sie sind anhand von Messwerten, wie zum Beispiel dem Gesamtabfluss des Einzugsgebietes, zu kalibrieren. Ein Beispiel ist das Verfahren von Renger und Wessolek [1990].

### **Zeitliche und räumliche Variabilität**

Für die Messung und Berechnung aller hydrologischen Größen besteht ein Zusammenhang zwischen Raum- und Zeitmaßstab. Je kleiner der Raum- und Zeitmaßstab, umso genauer sind die Ergebnisse. Die Übertragung dieser Ergebnisse auf größere Einzugsgebiete wird jedoch umso ungenauer, je kleiner der ursprüngliche Raum- und Zeitmaßstab und je größer das Einzugsgebiet ist. Ursache sind die stets nur punktuell möglichen Messungen sowie die große räumliche und zeitliche Variabilität der Einflussfaktoren auf die Wasserbilanz. Die Ungenauigkeiten nehmen neben der Größe auch mit wachsender Vielfalt der Eigenschaften des Gebietes zu. Berechnungsergebnisse mit Tageswerten sind deshalb nur für ein kleines Einzugsgebiet ausreichend genau. Mit der Zunahme der Größe des Gebietes ist eine Aufsummierung der Tageswerte zu Monats- oder Jahreswerten erforderlich. Für große Einzugsgebiete, die ganze Regionen umfassen, wird deshalb die Verwendung von Monats- und Jahressummen der Verdunstung empfohlen [DWA 1996].

Die zeitliche Variabilität ergibt sich hauptsächlich aus dem sehr unterschiedlichen Wetterverlauf sowohl im Laufe eines Jahres als auch im Vergleich der Jahresmittelwerte. So liegt beispielsweise in der 30-jährigen Regenreihe der Station Eich (Vogtlandkreis, Sachsen) die jährliche Niederschlagssumme zwischen maximal 1 101 mm/a (1974) und minimal 549 mm/a (1991) bei einem mittleren Niederschlag von 763 mm/a. Damit stand 1991 im Vergleich zu 1974 nur halb soviel Niederschlagswasser zur Verfügung.

Eine weitere zeitliche Variabilität entsteht durch die im Jahresverlauf wechselnden Wachstumsphasen der Pflanzen. Dabei ergeben sich besonders große Veränderungen bei einjährigen Ackerkulturen und bei Laub abwerfenden Pflanzen.

Die räumliche Variabilität wird bestimmt durch die unterschiedlichen Standortbedingungen. Dies betrifft sowohl klimatische und geografische Faktoren (Abstand zum Meer, orografische Höhe, Hangausrichtung) als auch die Landnutzung (Wald, Feld, bebautes Gebiet). Die klimatischen Standortbedingungen beeinflussen die potenzielle Verdunstung, während sich die Landnutzung auf die Höhe der tatsächlichen Verdunstung auswirkt.

Die Unterschiede werden größer, je kleinteiliger die einzelnen Flächen mit verschiedenen Eigenschaften sind. Die Problematik wird deutlich, vergleicht man die Untersuchung eines zusammenhängenden Waldgebietes mit der eines gleich großen Stadtgebietes. Während für den Wald überwiegend gleichmäßige Bedingungen zu verzeichnen sind, grenzen in bebauten Gebieten Flächen mit sehr unterschiedlichem hydrologischem Verhalten auf engem Raum aneinander. Dabei reicht das Spektrum von Wasserflächen über bewachsene Flächen bis zur vollständigen Versiegelung in Form von Straßen und Dächern.

Die Erfassung der gegenseitigen Beeinflussung aneinander grenzender Flächen mit unterschiedlichem Verdunstungsverhalten ist bisher nicht gelöst und wird in den meisten Fällen vernachlässigt. So ergeben sich unterschiedliche Verdunstungshöhen, wenn die über eine Untersuchungsfläche strömende Luft vorher eine Fläche mit hoher Verdunstung (z.B. Wasserfläche) oder eine Fläche mit geringer Verdunstung (z.B. Asphalt) überströmt hat. Dieser Einfluss ist zudem stark von der Windgeschwindigkeit abhängig. Mit der Änderung der Windrichtung können sich je nach Art der angrenzenden Flächen wieder völlig entgegengesetzte Verhältnisse ergeben. Eine kleinräumige Erfassung dieses Luftmassenaustauschs ist gegenwärtig nicht durchführbar.

Mithilfe von Korrekturfaktoren kann die gegenseitige Beeinflussung aneinander grenzender Flächen näherungsweise berücksichtigt werden. Diese lassen sich durch die Messung des Gesamtabflusses aus dem Einzugsgebiet kalibrieren.

### 2.5.4 Berechnung der Verdunstung von Landflächen mit dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren

Die Berechnungen der Verdunstung von Landflächen im Rahmen dieser Arbeit wird mit dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren durchgeführt (BAGLUVA = Verfahren nach **BA**grov und **GL**ugla zur Bestimmung vieljähriger Mittelwerte von tatsächlicher Verdunstungs- und Abflusshöhe). Das Verfahren wurde von Glugla [Glugla et al. 2003] unter Verwendung der Bagrov-Beziehung [Bagrov 1953] entwickelt und bei der Erarbeitung auf den ostdeutschen Raum ausgerichtet. Im Rahmen der Erstellung des Hydrologischen Atlas von Deutschland [BMU 2001] erfolgte eine umfassende Erweiterung der Berechnung mit dem Ziel der Anwendung für das gesamte Territorium der Bundesrepublik. Die grundlegenden Ergänzungen betrafen dabei die Erweiterung für Hanggebiete, die Berücksichtigung von Schnee und Beregnung sowie die Aktualisierung aller eingesetzten Parameter durch die Erhöhung der Anzahl der ausgewerteten langjährigen Lysimeterbeobachtungen. Die wissenschaftlichen Arbeiten zur Erweiterung des Verfahrens führte die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst aus. Von letzterem wurden die erforderlichen Klimadaten bereitgestellt. Eine ausführliche Herleitung und eine Begründung der Erweiterung des Verfahrens enthält der Bericht Nr. 1342 der Bundesanstalt für Gewässerkunde [Glugla et al. 2003].

Beim BAGLUVA-Verfahren handelt es sich um ein Wasserhaushaltsverfahren, mit dem die Verdunstung aus den Haupteinflussgrößen von Klima, Boden und Landnutzung bestimmt wird. Ausgangswerte sind mittlere jährliche Klimadaten und aktuelle Angaben zum Boden und zur Landnutzung. Die Ergebnisse sind mittlere Jahreswerte der Verdunstung und des Gesamtabflusses. Die Anwendung auf kürzere Zeiträume ist mit den angegebenen Algorithmen nicht möglich.

Die von Glugla modifizierte Bagrov-Beziehung lautet:

$$\frac{dET_a}{dP_{korr}} = 1 - \left( \frac{ET_a}{ET_{max}} \right)^n$$

mit  $P_{korr}$  langjähriger Mittelwert der Niederschlagshöhe nach Korrektur der systematischen Messfehler [mm/a]

$ET_a$  langjähriger Mittelwert der tatsächlichen Evapotranspirationshöhe [mm/a]

$n$  Effektivitätsparameter nach Bagrov [-]

$ET_{max}$  langjähriger Mittelwert der landnutzungsabhängigen maximalen Evapotranspirationshöhe bei ausreichendem Wasserangebot [mm/a]

Die Auflösung der Differentialgleichung nach der tatsächlichen Evapotranspirationshöhe  $ET_a$  ist analytisch nicht möglich und muss grafisch oder numerisch erfolgen.



Der Einfluss von Wasserangebot und verfügbarer Energie auf die Verdunstung werden in der Gleichung durch  $P_{kor}$  und  $ET_{max}$  erfasst. Die Ausnutzung dieses Wasser- und Energieangebots unter den gegebenen Standortbedingungen wird durch den Effektivitätsparameter  $n$  berücksichtigt.

Die Randbedingungen für die Bagrov-Glugla-Beziehung lauten:

- Bei Abnahme des Wasserangebots nähert sich die tatsächliche Verdunstung der Niederschlagsmenge an. Das gesamte zur Verfügung stehende Wasser verdunstet.

$$P_{kor} \rightarrow 0 \quad ET_a \rightarrow P_{kor}$$

- Mit Zunahme des Wasserangebots und bei Abnahme der verfügbaren Energie nähert sich die tatsächliche Verdunstung der maximalen Verdunstung an.

$$\left. \begin{array}{l} P_{kor} \rightarrow \infty \\ ET_{max} \rightarrow 0 \end{array} \right\} ET_a \rightarrow ET_{max}$$

Die Wasserbilanz eines Einzugsgebietes kann nach der Berechnung der tatsächlichen Verdunstung mit der Gleichung

$$R = P_{kor} - ET_a$$

ermittelt werden. Dabei ist  $R$  der langjährige mittlere Gesamtabfluss des Gebietes, der sowohl den oberirdischen als auch den unterirdischen Abfluss enthält.

In Bild 2-13 ist das Fließschema des Verfahrensablaufes abgebildet.

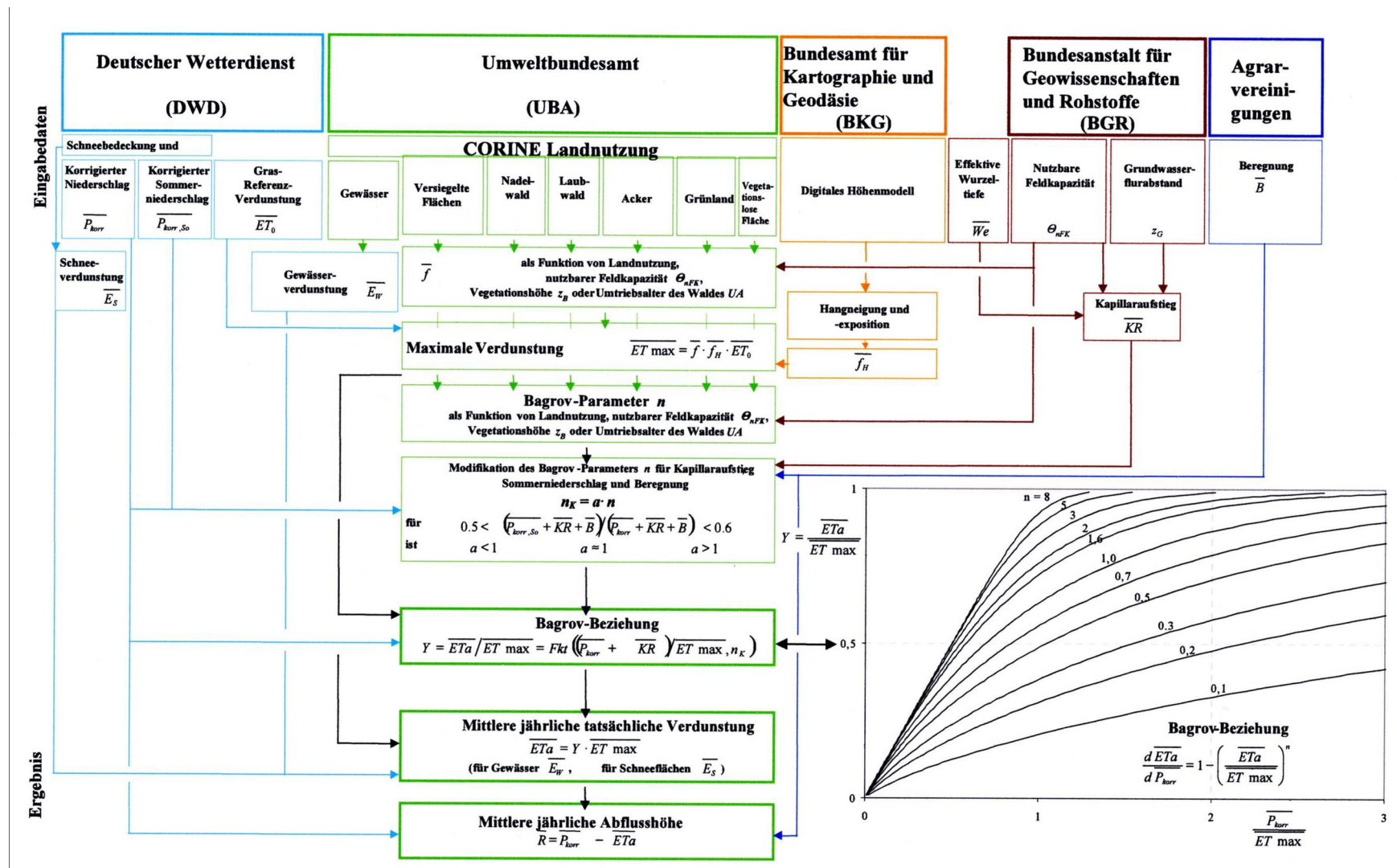


Bild 2-13

Fließschema des BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahrens [Glugla et al. 2003]

### Ermittlung des Wasserangebots

Das für die Verdunstung verfügbare Wasserangebot setzt sich zusammen aus dem korrigierten Niederschlag  $P_{\text{kor}}$ , der Beregnungsmenge  $B$  und der kapillaren Aufstiegsrate aus flurnahem Grundwasser  $KR$ .

Eine eventuelle künstliche Beregnungsmenge  $B$  wird einerseits zum Niederschlag hinzugezählt und andererseits durch einen Korrekturfaktor zum Bagrov-Parameter  $n$  berücksichtigt. In den Korrekturfaktor geht sowohl die Erhöhung der Verdunstung als auch die Erhöhung der Versickerung infolge der Beregnung ein.

Der kapillare Aufstieg  $KR$  bei flurnahem Grundwasser erhöht die für die Verdunstung zur Verfügung stehende Wassermenge. Zu ermitteln ist bei bewachsenen Flächen, wie viel Kapillarwasser bis zur Untergrenze der von den Pflanzen erreichbaren Ausschöpfungszone aufsteigen kann. Bei vegetationslosen Flächen ist der kapillare Aufstieg bis zur Bodenoberfläche zu berücksichtigen. Der kapillare Aufstieg versiegelter Flächen kann vernachlässigt werden, da er je nach Art der Befestigung gering bis Null (Dachflächen) ist.

Die kapillare Aufstiegsrate ist abhängig von:

- Bodenart und deren Lagerungsdichte
- Abstand zwischen Grundwasser und Untergrenze der Ausschöpfungszone
- Pflanzenart und -größe
- Landnutzungsart.

### Ermittlung der maximalen Verdunstung $ET_{\text{max}}$

Die für die Verdunstung verfügbare Energie wird beim BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren über die maximal mögliche Verdunstung  $ET_{\text{max}}$  berücksichtigt. Sie wird ausgehend von der potenziellen Verdunstung in Form der Gras-Referenzverdunstung  $ET_0$  ermittelt. Die maximale mögliche Verdunstung erfasst das Energiedargebot anhand der klimatischen und geographischen Standortbedingungen. Der Einfluss der Landnutzung auf die Energieausnutzung wird über den Koeffizient  $f$  und der Einfluss von Hangneigung und Hangausrichtung über den Koeffizient  $f_H$  berücksichtigt.

$$ET_{\text{max}} = ET_0 \times f \times f_H$$

mit	$ET_0$	Gras-Referenzverdunstung [mm/a]
	$f$	Koeffizient, abhängig von der Landnutzung
	$f_H$	Koeffizient, abhängig von der Hangneigung und Hangausrichtung

### Betrag der Gras-Referenzverdunstung $ET_0$

Die mittlere jährliche potenzielle Verdunstungshöhe als Gras-Referenzverdunstung  $ET_0$  wurde im Rahmen der Erstellung des Hydrologischen Atlas von Deutschland [BMU 2001] für das gesamte Territorium der Bundesrepublik mit einer Rasterweite von 1×1 km berechnet (Bild



2-14). Die Kartendarstellung zeigt anschaulich die Abnahme der potenziellen Verdunstung mit zunehmender orografischer Höhe in den Mittelgebirgen und den Alpen. Der Verlauf der Gebirge ist dadurch deutlich erkennbar. Die Gras-Referenzverdunstung nimmt außerdem von Norden nach Süden infolge der steigenden Sonnenstrahlung zu.

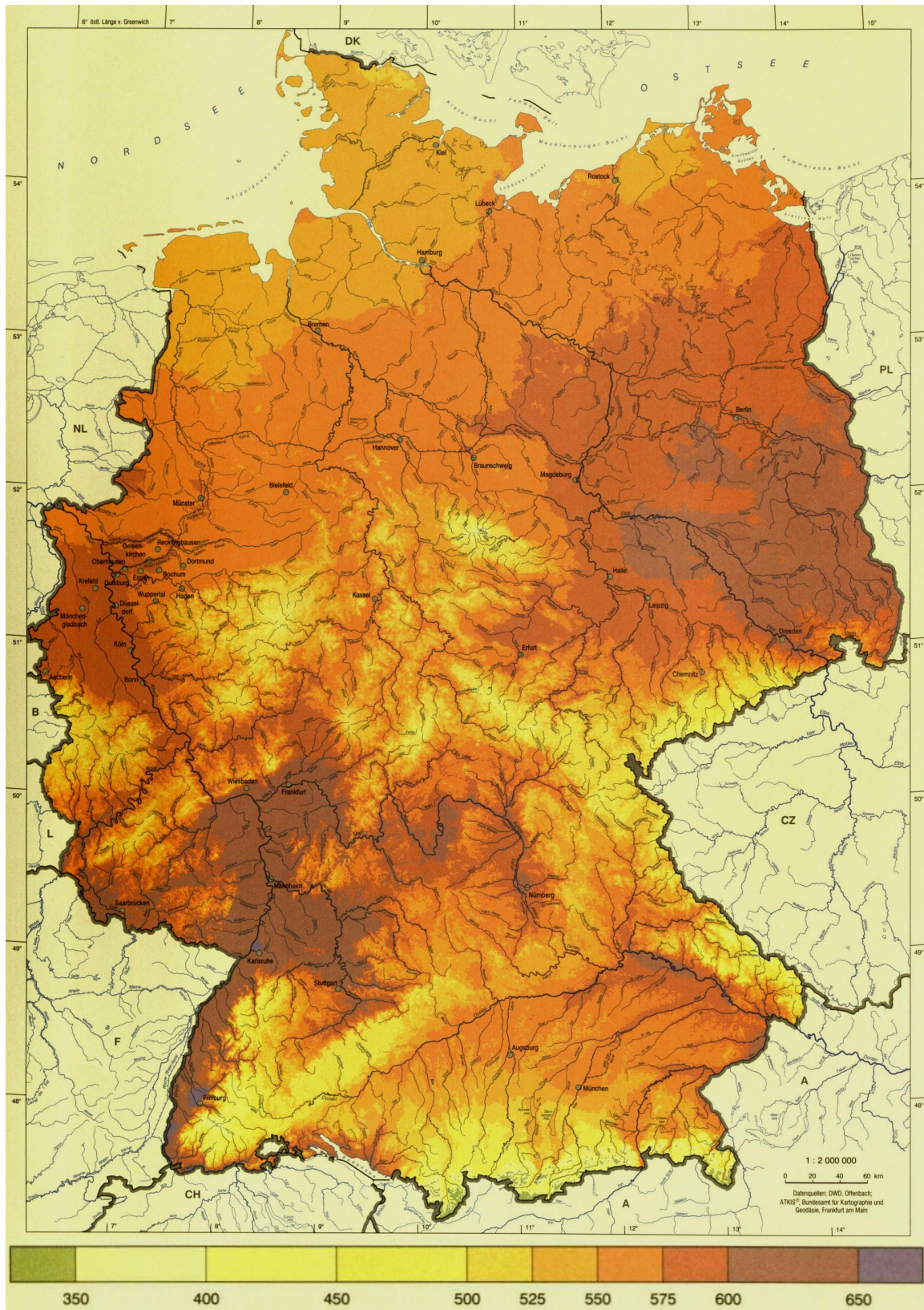


Bild 2-14

Mittlere jährliche potenzielle Verdunstung als Gras-Referenzverdunstung [mm/a], Hydrologischer Atlas von Deutschland [BMU 2001]

Weiterhin ist sichtbar, dass der Verdunstungsanspruch der Luft mit zunehmendem Abstand vom Meer in Richtung Osten und Süden zunimmt. Die höchsten Werte mit etwa 650 mm/a treten in der Rhein-Main-Ebene, im südlichen Brandenburg und im östlichen Sachsen auf. Die niedrigste potenzielle Verdunstung wird mit etwa 350 mm/a in den Höhenlagen der Mittelgebirge und der Alpen erreicht.

### **Berücksichtigung der Landnutzung**

Im BAGLUVA-Verfahren werden die Oberflächen in sechs Landnutzungstypen unterteilt:

- Versiegelte Fläche
- Nadelwald
- Laubwald
- Ackerland
- Grünland und
- vegetationslose Fläche.

Die Besonderheiten dieser Landnutzungstypen werden mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren für die Ermittlung des Koeffizienten  $f$ , des kapillaren Aufstiegs  $KR$  und des Bagrov-Parameters  $n$  erfasst.

Die Unterteilung der Oberflächen erfolgt entsprechend der Nomenklatur der CORINE-Landnutzungsdaten. Diese Klassifizierung wurde im „CORINE Land Cover“-Programm der Europäischen Union für die Satelliten gestützte Erfassung und Auswertung der Landnutzung und Bodenbedeckung erarbeitet (CORINE = **CO**oRdinated **IN**formation on the **E**nvironment). Die Oberflächen bebauter Gebiete sind in 4 Gruppen (Ebene 2) und 11 Arten (Ebene 3) unterteilt. Für die 11 Arten der Ebene 3 sind %-Anteile der im Verfahren implementierten verschiedenen Landnutzungstypen angegeben. Eine kleinräumigere Unterscheidung erfolgt nicht. Für die vorgesehene Untersuchung einzelner Baugebiete oder Stadtteile ist diese prozentuale Aufteilung nicht ausreichend, da eine Erfassung der tatsächlichen Flächen und deren Nutzungsarten erforderlich ist. Zudem sind einige spezielle urbane Nutzungsarten im BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren nicht erfasst. Dazu gehören:

- Einzelbäume
- Gründächer
- Fassadenbegrünungen
- Versickerungsmulden

Für diese wurden auf der Basis der im Verfahren enthaltenen Algorithmen zusätzliche Berechnungsansätze aufgestellt. Die Erläuterung dieser Berechnungsansätze erfolgt im Kapitel 3.4.2 Bewachsene Flächen in bebauten Gebieten.

### Berechnung des Koeffizienten $f$

Die Algorithmen zur Bestimmung des Koeffizienten  $f$  für die verschiedenen Landnutzungstypen wurden mithilfe der Auswertung umfangreicher Lysimeteruntersuchungen ermittelt und anschließend anhand von Messergebnissen aus der Untersuchung der Wasserhaushaltsgrößen mehrerer unterschiedlicher Einzugsgebiete überprüft und geeicht. Als Ausgangsdaten dienten Tageswerte der gemessenen tatsächlichen Verdunstung der Lysimeter bei Bodenfeuchten im Bereich der Feldkapazität, die mit der Gras-Referenzverdunstung  $ET_0$  verglichen wurden. Die Tageswerte wurden anschließend zu langjährigen Mittelwerten aufsummiert. Eine ausführliche Herleitung der Algorithmen für die Ermittlung des Koeffizienten zur Berücksichtigung der Landnutzung  $f$  ist in Glugla et al. [2003] enthalten.

Der Koeffizient  $f$  für vegetationslose Flächen ist nur von der Bodenart und der dafür charakteristischen Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität abhängig. Bei bewachsenen Flächen kann über die Wurzeln zusätzliches Wasser für die Verdunstung erschlossen werden. Die jahreszeitlichen Schwankungen aufgrund der phänologischen Stadien der Ackerpflanzen sind im Standortfaktor mit berücksichtigt.

Der Wertebereich des Koeffizienten  $f$  für vegetationslose Flächen, Ackerflächen und Grünland liegt zwischen 0,8 und 1,2 (Tabelle 2-3). Für alle versiegelten Flächen ist  $f = 0,8$ .

Tabelle 2-3 Koeffizient  $f$  für verschiedene Böden und Landnutzungen [Ad-hoc-AG Boden 2003]

Bodenart	Landnutzungsart		
	Vegetationslos	Grünland	Acker
Sand, rein (Ss)	0,8	0,8	1,0
Sand, lehmig (IS)	1,0	1,0	1,1
Sand, schluffig (uS)	1,1	1,0	1,1
Lehm, sandig (sL)	0,9	0,9	1,0
Lehm, tonig (uL)	0,9	1,0	1,0
Schluff, sandig (sU)	1,1	1,1	1,2
Schluff, lehmig (IU)	1,1	1,1	1,1
Schluff, tonig (tU)	1,1	1,1	1,1
Ton, lehmig (IT)	0,8	0,8	0,9
Ton, schluffig (uT)	0,8	0,8	1,0

Die Bestimmung des Koeffizienten  $f$  für Wälder erfolgt in Abhängigkeit vom Umtriebsalter  $UA$  und der Bodenart. Unter dem Begriff Umtriebsalter versteht man in der Forstwirtschaft das Baumalter, bei dem der jeweilige Bestand geschlagen werden soll.

Die Bodenart wird mittels unterschiedlicher Algorithmen für sandige Böden (Bodenfeuchte bei nutzbarer Feldkapazität  $\Theta_{nFK} \leq 16 \%$ ) und bindige Böden ( $\Theta_{nFK} > 16 \%$ ) berücksichtigt. In Bild 2-15 ist die Abhängigkeit von  $f$  für Nadel- und Laubwälder vom Umtriebsalter und der Bodenart grafisch dargestellt. Der Wertebereich von  $f$  liegt für Wälder zwischen 1,1 und 1,3.



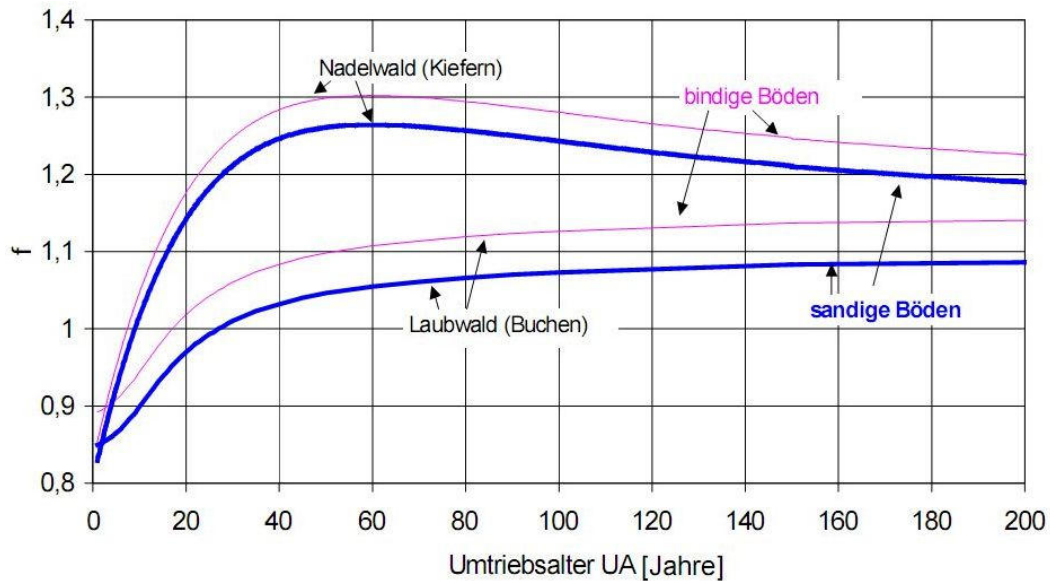
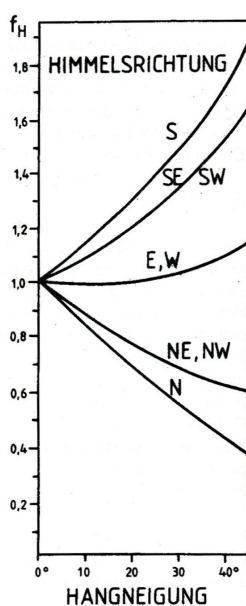


Bild 2-15 Koeffizient  $f$  für Laub- und Nadelwald für bindige und sandige Böden in Abhängigkeit vom Umtriebsalter [Glugla et al. 2003]

#### Koeffizient $f_H$ zur Berücksichtigung von Hangneigung und Hangausrichtung

Grundlage für die Berechnungen ist bisher eine horizontale Bezugsfläche. Der Koeffizient  $f_H$  erfasst die Abweichung von der Horizontalen aufgrund der tatsächlichen Hangneigung und Hangausrichtung. Die im BAGLUVA-Verfahren angewandten Parameter wurden von Golf [1981] hergeleitet.



Für eine ebene Fläche beträgt  $f_H = 1,0$ . Der Wertebereich reicht für extreme Standorte mit einer Geländeneigung von  $45^\circ$  bei ganzjähriger Betrachtung von  $f_H = 0,4$  für eine nach Norden geneigte Fläche bis zu  $f_H = 2,0$  für Südlagen. Im Winterhalbjahr sind die Auswirkungen der Hangneigung und -ausrichtung aufgrund des flachen Sonnenstandes besonders ausgeprägt. Die Abhängigkeit des Koeffizienten  $f_H$  von der Hangneigung und der Himmelsrichtung ist in Bild 2-16 als Jahresmittelwert grafisch angegeben.

Die Berücksichtigung der Hangneigung und Hangausrichtung erfolgt erst ab einer Geländeneigung  $>5^\circ$ . Im Bereich von 0 bis 5 Grad wird die Abweichung von der horizontalen Bezugsfläche vernachlässigt.

Bild 2-16 Koeffizient  $f_H$  zur Berücksichtigung von Hangneigung und Hangausrichtung [Golf 1981]

### **Ermittlung des Bagrov-Parameter $n$**

Der Bagrov-Parameter  $n$  berücksichtigt die von der Landnutzung abhängige Verfügbarkeit des Niederschlagswassers für die Verdunstung. Erfasst werden dabei Bodenspeicher, Interzeptionsspeicher und die Parallelität des Jahresgangs von Energie- und Wasserverfügbarkeit.

Die Quantifizierung des Parameters  $n$  erfolgte von der Bundesanstalt für Gewässerkunde nach der Auswertung der Daten von 68 bundesweit verteilten Lysimeter-Stationen mit verschiedenen Landnutzungen. Für die Anwendung im Berechnungsverfahren wurden Algorithmen für die einzelnen Landnutzungstypen aufgestellt. Deren Herleitung ist in Glugla et al. [2003] ausführlich erläutert.

Der Interzeptionsspeicher wird unter Berücksichtigung der Pflanzenart, der Pflanzenentwicklung und des Niederschlags erfasst. Erforderliche Eingangsdaten für das Berechnungsverfahren sind die Landnutzungsart, das Umtriebsalter  $UA$  bei Wäldern und die Pflanzenhöhe  $z_B$  bei Grünland. Für den Landnutzungstyp „Ackerfläche“ ist der Einfluss der Entwicklungsstadien der Pflanzen im Jahresverlauf und der jährlich wechselnden Fruchtfolgen durch die Mittelung über langjährige Messreihen enthalten.

Die Größe des Bodenspeichers wird hauptsächlich durch die Bodenart und deren Fähigkeit zur Wasserspeicherung sowie bei bewachsenen Flächen durch die effektive Durchwurzelungstiefe bestimmt. Für die Verdunstung bewachsener Flächen ist die nutzbare Feldkapazität des Bodens entscheidend.

Der Einfluss der Durchwurzelungstiefe wird über die Ausschöpfungstiefe  $We$  ermittelt. Diese kann über empirische Gleichungen aus der Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität des anstehenden Bodens, dem Umtriebsalter bei Bäumen und der Pflanzenhöhe bei Grünland berechnet werden.

Der Wertebereich des Bagrov-Parameters  $n$  liegt für bewachsene Flächen zwischen  $n = 10$  für Wälder auf schluffigen Böden und  $n = 0,3$  für vegetationslose sandige Böden. Bei befestigten Flächen liegt der Parameter zwischen  $n = 0,4$  für Rasengittersteine und  $n = 0,09$  für Dachflächen. Es gilt: Je geringer die Speicherfähigkeit des Bodens, desto kleiner der Parameter  $n$ .

Der Einfluss des Bagrov-Parameters  $n$  auf die tatsächliche Verdunstung ist bei einem Verhältnis von  $P_{kor} / ET_{max}$  nahe 1 besonders ausgeprägt. Mit der Zunahme der Niederschläge wirkt sich dagegen der Koeffizient  $f$  stärker aus [DWA 2002:92].



Korrigierter Bagrov-Parameter  $n_k$ 

In den Sommermonaten kann die maximal mögliche Verdunstung durch die zeitweise begrenzte Wasserverfügbarkeit nicht immer vollständig ausgenutzt werden. Die Auswirkungen werden durch den korrigierten Bagrov-Parameter  $n_k$  erfasst, indem der Bagrov-Parameter  $n$  mit einem Faktor  $a$  multipliziert wird, der über den Anteil des Niederschlags im Sommerhalbjahr  $P_{\text{korr, SHJ}}$  an der Jahressumme  $P_{\text{korr}}$  die Parallelität des Jahresgangs der Energie- und Wasserverfügbarkeit berücksichtigt.

In die Berechnung des Korrekturfaktors wird das durch kapillaren Aufstieg und bei künstlicher Bewässerung zusätzlich verfügbare Wasser einbezogen.

Die Gleichungen zur Korrektur des Bagrov-Parameters lauten:

$$n_k = a \times n \quad \text{mit} \quad a = 0,77 + \frac{0,0189}{(1 - Q_n)^3} \quad \begin{array}{l} \text{für versiegelte und vegetationslose Flächen,} \\ \text{für Grünland und nicht bewässerte bewachsene} \\ \text{Flächen sowie} \end{array}$$

$$a = 0,8 + \frac{0,05136}{(1 - Q_n)^3} - \frac{0,1542}{1 - Q_n} \quad \text{für bewässerte Ackerflächen}$$

$$Q_n = \frac{P_{\text{korr, SHJ}} + KR + B}{P_{\text{korr}} + KR + B}$$

$a, Q_n$  Faktoren zur Berücksichtigung des Anteils des Niederschlags im Sommerhalbjahr am Jahresniederschlag

$P_{\text{korr, SHJ}}$  korrigierter Niederschlag im Sommerhalbjahr (Monate Mai bis Oktober) [mm/a]

$KR$  kapillarer Wasseraufstieg [mm/a]

$B$  Beregnungsmenge [mm/a]

Der Anteil des mittleren Sommerniederschlags am Jahresniederschlag liegt in Deutschland zwischen 0,45 und 0,65 mit einer Häufung um 0,55. Die Berücksichtigung des Korrekturfaktors ist nur für  $Q_n < 0,5$  und  $Q_n > 0,6$  entsprechend der angegebenen Formeln erforderlich. In allen anderen Fällen ist  $a = 1$  [Glugla et al. 2003].

**Ausgangsdaten und Datenquellen**

Die für die Berechnung erforderlichen Ausgangswerte sind mit Angabe der Quellen in Tabelle 2-4 zusammengestellt. Ein Vorteil des Verfahrens besteht in der breiten Datenbasis durch die Anwendung langjähriger Mittelwerte der Klimadaten. Diese Daten sind für alle Standorte in der Bundesrepublik ohne großen Aufwand erhältlich. Die erforderlichen Landnutzungsdaten werden bezogen auf den jeweiligen Standort vor Ort erfasst.

Die Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität kann, sofern keine eigenen Daten vorliegen, mit ausreichender Genauigkeit aus einschlägigen Tabellen entnommen werden.

Angaben zu den Bodeneigenschaften sind beispielsweise in der „Bodenkundlichen Kartieranleitung“ [Ad-hoc-AG Boden 2005] und in den „Verknüpfungsregeln“ der Ad-hoc-AG Boden [Ad-hoc-AG Boden 2003] angegeben.

**Tabelle 2-4** Erforderliche Ausgangsdaten und Quellen für die Berechnung der Verdunstung mit dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren

Erforderliche Angaben			Quelle
Klimadaten			
Langjähriger Mittelwert der Niederschlags- höhe nach Korrektur der systematischen Messfehler	$P_{kor}$	[mm/a]	Hydrologischer Atlas von Deutschland [BMU 2001]
Korrigierter Niederschlag im Sommerhalb- jahr (SHJ)	$P_{kor, SHJ}$	[mm]	
Gras-Referenzverdunstung	$ET_0$	[mm/a]	
Angaben zur Landnutzung			
Angaben zum Boden			
Bodenart der Ausschöpfungszone			ortsspezifische Angaben
Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität	$\Theta_{nFK}$	[Vol- %]	ortsspezifische Messungen oder Bodenkundliche Kartieranleitung, DWA Merkblatt 238 [1996]
Angaben zur Vegetation			
Pflanzenart			Bestandserfassung oder Planung
Umtriebsalter bei Wald	$UA$	[a]	Ad-hoc-AG Boden, Verknüpfungsregel 3.19
Pflanzenhöhe bei Grünland	$z_B$	[cm]	ortsspezifische Angaben
Angaben zum Grundwasser			
Grundwasserflurabstand	$z_G$	[m]	ortsspezifische Angaben
Berechnungsmenge	$B$	[mm/a]	ortsspezifische Angaben
Angaben zur Hanglage			
Hangneigung		[ ° ]	Bestandserfassung oder Planung
Hangausrichtung			Bestandserfassung oder Planung
Art der Befestigung bei versiegelten Flächen			Bestandserfassung oder Planung

### Grenzen des Verfahrens

Das BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren ist ein konzeptionelles Berechnungsverfahren. Die natürlichen Prozesse werden nur teilweise mit physikalisch basierten Ansätzen erfasst und zusätzlich mit empirischen Ansätzen kombiniert. Nach Untersuchungen der DWA [1994] stellen physikalische Verfahren zwar die hydrologischen Prozesse am genauesten dar, fordern jedoch auch den höchsten Aufwand für die Datenbereitstellung. Durch die Ausgabe von langjährigen Jahresmittelwerten kann mit dem BAGLUVA-Verfahren eine Genauigkeit erreicht werden, die der von physikalischen Verfahren mit erheblich höherem Aufwand für die Datenbeschaffung entspricht.

Das Verfahren liefert langjährige Jahresmittelwerte. Sind Angaben zu kürzeren Zeitschritten erforderlich, kann die ermittelte mittlere Jahressumme näherungsweise anhand von statistisch ermittelten Anteilen der Monate an der Jahressumme auf die einzelnen Monate aufgeteilt werden.

Der Einfluss der Bodenart wird nur vereinfacht berücksichtigt. So können keine unterschiedlichen Bodenhorizonte erfasst werden. Zur Berücksichtigung verschiedener Bodenarten ist der Mittelwert der Bodeneigenschaften zu erfassen oder es sind die Eigenschaften der maßgeblichen Bodenart zu verwenden. Bei der Ermittlung der Parameter  $f$ ,  $W_e$  und  $n$  erfolgt für die Landnutzungsarten Laub- und Nadelwald nur eine Unterscheidung in bindige und sandige Böden und die Berücksichtigung der Bodenfeuchte.

Die Landnutzungsarten wurden aus den CORINE-Landnutzungsdaten übernommen. Für die detaillierte Untersuchung der Oberflächen bebauter Gebiete ist diese Gliederung jedoch zu grob, da in den CORINE-Daten nur eine Unterteilung hinsichtlich der überwiegenden Nutzung erfolgt (z.B. durchgehende oder nicht durchgehende städtische Prägung, Industrie- und Gewerbegebiet, städtischen Grünflächen). Für die Erfassung der unversiegelten Oberflächen in bebauten Gebieten, wie zum Beispiel Gründächer, Einzelbäume und Sträucher, sind zusätzliche Ansätze zu ergänzen.

Alle Ackerflächen werden im BAGLUVA-Verfahren unabhängig von der tatsächlichen Fruchtfolge auf der Basis von Mittelwerten zusammengefasst. Der Algorithmus berücksichtigt lediglich die Bodenart.

Die Bagrov-Beziehung ist nicht für alle Werte des Bagrov-Effektivitätsparameters explizit lösbar, deshalb muss die Lösung durch Iteration oder grafisch erfolgen.

Die Auswirkungen der gegenseitigen Beeinflussung von benachbarten Flächen mit unterschiedlichen hydrologischen Eigenschaften muss auch im BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren vernachlässigt werden. Dazu ist bisher noch kein Lösungsansatz gefunden worden. Generell gilt: Je größer die Unterschiede der Flächengröße und der hydrologischen Eigenschaften benachbarter Teilflächen sind, umso größer sind die Auswirkungen auf die kleinere Teilfläche.

### 2.5.5 Ermittlung der Verdunstung von Wasserflächen

Über Wasserflächen kann die für die Verdunstung zur Verfügung stehende Energie stets vollständig ausgenutzt werden. Eine Unterscheidung in potenzielle und tatsächliche Evaporation ist nicht erforderlich, da im Gegensatz zu Landflächen keine zeitweise Einschränkung der Wasserverfügbarkeit besteht. Die Evaporationshöhe der Wasserflächen wird neben dem Energieangebot maßgeblich vom Verdunstungsanspruch der Luft bestimmt. Damit verbunden ist eine starke Abhängigkeit von den Windverhältnissen am Standort.

Die Messung der Evaporation von Wasserflächen kann direkt durch auf dem Wasser schwimmende Verdunstungskessel und -pfannen erfolgen. Weltweit existieren dazu langjährige Messreihen mit unterschiedlich genormten Behältern. Die systematischen Messfehler, zum Beispiel durch Wellen und die Beeinflussung des Windfeldes, müssen für die Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung der Wasserfläche durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden.

Für die Berechnung der Evaporation von Wasserflächen wurde eine Vielzahl von Methoden entwickelt. Die am weitesten verbreiteten Berechnungsmethoden basieren auf dem aerodynamischen Verfahren, dem Energiebilanzverfahren und den durch Verbindung dieser Verfahren abgeleiteten Kombinationsverfahren. Ausführliche Angaben zu diesen Verfahren sind im DWA Merkblatt M238 „Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen“ [DWA 1996] und in Vietinghoff [2002] enthalten.

Das aerodynamische oder Dalton-Verfahren ist ein empirisches Verfahren und beruht auf dem Massentransport. Dabei wird ermittelt, wie viel Energie mit den von der Luft aufgenommenen Wassermolekülen abtransportiert wird. Zur Berechnung werden die Temperatur der Wasseroberfläche, die Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit benötigt [DWA 1996]. Der Vorteil des Verfahrens besteht im geringen Aufwand für die Datenbeschaffung.

Die Energiebilanzverfahren ermitteln die Verdunstungshöhe als Restglied aus der Berechnung aller am Energieumsatz beteiligten Größen. Ausgehend von der Nettostrahlung kann die Änderung des Wärmeinhalts des Gewässers bestimmt werden. Die Bilanz der Strahlungsgrößen und der Wärmeinhaltsänderung ergibt den Verdunstungswärmestrom. Für diese Verfahren ist ein höherer Aufwand für die Bereitstellung der Messdaten erforderlich. Teilweise lassen sich die Strahlungsdaten auch über empirische Beziehungen aus leichter verfügbaren Daten errechnen.

Bei den Kombinationsverfahren werden die Ansätze des Massentransports und der Energiebilanz miteinander verknüpft. Am weitesten verbreitet sind davon das Penman-Verfahren und das Temperaturgleichgewichtsverfahren.

Die Berechnung der Verdunstung von Gewässern ist im BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren nicht enthalten und erfolgt in dieser Arbeit nach dem Temperaturgleichgewichtsverfahren. Dabei handelt es sich um ein Kombinationsverfahren, das die Energiebilanz mit dem Daltonansatz verbindet. Bei diesem Verfahren sind keine Daten zur Temperatur der Wasseroberfläche notwendig. Das ist von großem Vorteil, da Messreihen zur Oberflächentemperatur nur für sehr wenige Gewässer vorliegen. Die Temperatur der Wasseroberfläche wird im Verfahren durch Iteration ermittelt. Dazu wird die Oberflächentemperatur schrittweise so lange variiert, bis sowohl die Energiebilanz als auch der Dalton-Ansatz das gleiche Resultat ergeben.

Die Gleichung des Temperaturgleichgewichtsverfahrens für Wasserflächen lautet:

$$(R_G \times (1 - \alpha) - (Rn_L + \Delta Rn_L) - \Delta S - H - V) / L = f(v) \times (e_s(Tw_o) - e)$$

(..... Energiebilanz ..... ) ( ... Dalton - Ansatz... )

mit	$R_G$	Globalstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]
	$\alpha$	Albedo der Wasseroberfläche [-]
	$Rn_L$	effektive Abstrahlung der Wasseroberfläche bei Lufttemperatur [W/m <sup>2</sup> ]
	$\Delta Rn_L$	Änderung der effektiven Abstrahlung infolge der Differenz zwischen Luft- und Wassertemperatur [W/m <sup>2</sup> ]
	$\Delta S$	Änderung der Energiespeicherung im Gewässer [W/m <sup>2</sup> ]
	$H$	Strom fühlbarer Wärme [W/m <sup>2</sup> ]
	$V$	Energieeintrag durch zuströmendes Wasser [W/m <sup>2</sup> ]
	$L$	Verdampfungswärme des Wassers [W × d/(mm × m <sup>2</sup> )]
	$f(v)$	Windfunktion [m/s]
	$e_s(Tw_o)$	Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur der Wasseroberfläche [hPa]
	$e$	Dampfdruck der Luft [hPa]

Die Größen  $\Delta S$  und  $V$  gehen bei langfristigen Untersuchungen gegen Null und können bei der Anwendung langjährigen Mittelwerte in den meisten Fällen vernachlässigt werden.

Die für das Temperaturgleichgewichtsverfahren erforderlichen Eingangsdaten sind in Tabelle 2-5 aufgeführt. Sie können hinsichtlich ihrer Quelle unterteilt werden in

- Daten aus der Wetterbeobachtung am Standort
- von der geografischen Breite des Standorts abhängige Daten.

Die von der geografischen Breite des Standorts abhängigen Daten können aus Tabellen entnommen oder berechnet werden.

**Tabelle 2-5** Erforderliche Ausgangsdaten und Quellen für die Berechnung der Evaporation von Wasserflächen mit dem Temperaturgleichgewichtsverfahren

Erforderliche Angaben			Quelle
Klimadaten			
Lufttemperatur	$T$	[°C]	Standardmessungen des Deutschen Wetterdienstes - Angaben der nächstgelegenen Klimastation
Luftfeuchtigkeit	$U$	[%]	
Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe	$v_{2m}$	[m/s]	
Tatsächliche Sonnenscheindauer	$S$	[h]	
Strahlungsdaten			
Extraterrestrische Strahlung	$R_0$	[W/m²]	Berechnung aus der geografischen Breite
Astronomisch mögliche Sonnenscheindauer	$S_0$	[h]	
Albedo der Wasseroberfläche	$\alpha$	[-]	Tabellen (z.B. DWA M 238 Tafel 5.3 und 5.4)
Koeffizienten zur Berechnung der Globalstrahlung	$a, b$	[-]	
(Alle Daten als Monatsmittelwerte)			

Der Wind hat einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der Verdunstung, ist allerdings sowohl von Standort zu Standort als auch zeitlich sehr unterschiedlich und damit schwer exakt zu erfassen. Die Windfunktionen sind deshalb entweder zu kalibrieren oder es sind Windfunktionen auszuwählen, die unter ähnlichen klimatischen und Standortbedingungen aufgestellt wurden. Eine Auswahl von Windfunktionen, die an verschiedenen Standorten empirisch ermittelt wurden, ist in DWA [1996] enthalten. Die Windfunktionen werden allgemein in der Form

$$f(v) = a + b \times v_{2m}^c$$

dargestellt. Die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  berücksichtigen die unterschiedlichen Standortbedingungen und sind durch Messungen zu ermitteln.

Für Standorte mit mittleren Windgeschwindigkeiten  $v_{2m} > 1,2$  m/s kann der Ansatz nach Wittenberg [1985] verwendet werden. Dies trifft in der Bundesrepublik für die meisten Gebiete zu. Die Windfunktion lautet dann:

$$f(v) = m \times v_{2m}$$

mit  $m$  Massentransportkoeffizient [mm × s/(m × d × hPa)]  
 $v_{2m}$  mittlere Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m/s]

Die Daten des Deutschen Wetterdienstes zur Windgeschwindigkeit stammen oft aus Beobachtungen der Windstärke nach der Beaufort-Skala. Die Umrechnung auf die entsprechende Windgeschwindigkeit  $v_{2m}$  in m/s für eine Höhe von 2 m über dem Gelände erfolgt näherungsweise mit der Beziehung [DWA 1996]:

$$v_{2m} = 0,6 \times WS^{3/2} + 0,1 \quad \text{mit} \quad WS \dots \text{Windstärke in Beaufort (Bft)}$$

Einen erheblichen Einfluss auf die Evaporation der Wasserflächen haben die Größe und die Form des Gewässers. Mit zunehmender Überstreichlänge reichert sich die Luft mit Feuchtigkeit an und das Sättigungsdefizit der Luft nimmt ab. Die spezifische Verdunstung wächst deshalb mit kleiner werdender Gewässeroberfläche an. Diese Reaktion wird als Oaseneffekt bezeichnet. Bei Energiezufuhr aus angrenzenden Flächen kann dadurch die potenzielle Verdunstung auch deutlich überschritten werden.

### **3 Wasser- und Energiebilanz in Abhängigkeit von der Landnutzung**

#### **3.1 Systematisierung der Oberflächen unbebauter und bebauter Gebiete**

Die Verdunstung ist ein Prozess, der nur an der Oberfläche eines Körpers stattfindet. Damit ist die Verdunstung eines Gebietes neben den klimatischen Bedingungen entscheidend von der Art und den Eigenschaften der das Gebiet bedeckenden Oberflächen abhängig.

Für die Untersuchung der hydrologischen Eigenschaften eines Gebietes gilt: Je größer die Fläche des Untersuchungsgebietes und je vielfältiger die Flächennutzung, desto größer wird der Aufwand für die Datenbeschaffung. Um diesen Aufwand zu reduzieren, ergibt sich die Notwendigkeit der Zusammenfassung von Flächen mit gleichen hydrologischen Eigenschaften. Der erforderliche Grad der Zusammenfassung wächst mit der Größe des Untersuchungsgebietes. So ist es beispielsweise bei der Betrachtung ganzer Flusseinzugsgebiete in den meisten Fällen ausreichend, den Einfluss der bebauten Flächen über einen mittleren Versiegelungsgrad zu berücksichtigen. Die detaillierte Untersuchung aller Teilflächen wäre zu aufwändig. Einzugsgebiete im Umfang eines Bebauungsplanes können dagegen mit hoher Detailgenauigkeit untersucht werden.

In Abhängigkeit vom jeweiligen Ziel der Untersuchung werden unterschiedliche Systematisierungen für Flächen mit ähnlichen hydrologischen und stadtklimatischen Eigenschaften angewandt. In bebauten Gebieten erfolgt meistens eine Unterteilung auf Block- oder Wohngebietsgröße. Dabei wird das ähnliche Mikroklima von Stadtteilen bestimmter Siedlungsformen zusammengefasst. Weit verbreitet ist eine Unterteilung nach Siedlungsdichte und Nutzungsarten in: Stadtkern, Gewerbegebiet, Stadtrandzone mit Einfamilien- und Reihenhausbauung, Gartenstadt, Parkanlage [Innenministerium Baden Württemberg 2007].

Eine großräumige Unterteilung der Landoberflächen erfolgt im Projekt „CORINE-Landnutzungsdaten“ der Europäischen Union, bei dem alle Landoberflächen für eine Satelliten gestützte Auswertung in drei Ebenen klassifiziert werden [Keil et al. 2005]. In der untersten Ebene 3 werden die möglichen Landnutzungsarten in 44 Landnutzungsklassen unterteilt. In Tabelle 3-1 ist die Nomenklatur der CORINE-Landnutzungsdaten aufgeführt. In der Bundesrepublik nicht vorkommende oder nicht gesondert ausgewiesene Landnutzungsklassen sind kursiv dargestellt.

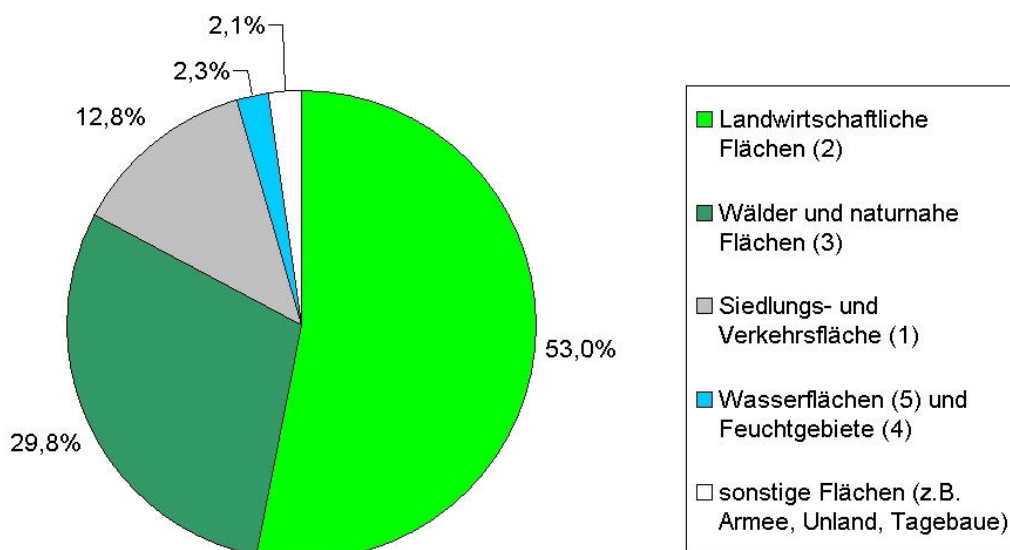


Tabelle 3-1 Nomenklatur der CORINE-Landnutzungsdaten [Keil et al. 2005]

Ebene 1 - Kategorien	Ebene 2 - Gruppen	Ebene 3 - Klassen
1 Bebaute Flächen	1.1 Städtisch geprägte Flächen	1.1.1 Durchgängig städtische Prägung
		1.1.2 Nicht durchgängig städtische Prägung
	1.2 Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen	1.2.1 Industrie- und Gewerbeflächen
		1.2.2 Straßen- und Eisenbahnnetze
		1.2.3 Hafengebiete
		1.2.4 Flughäfen
	1.3 Abbauflächen, Deponien und Baustellen	1.4.1 Abbauflächen
		1.4.2 Deponien und Abraumhalden
		1.4.3 Baustellen
	1.4 Künstlich angelegte, nicht landwirtschaftlich genutzte Grünflächen	1.4.1 Städtische Grünflächen
		1.4.2 Sport- und Freizeitanlagen
2 Landwirtschaftliche Flächen	2.1 Ackerflächen	2.1.1 Nicht bewässertes Ackerland
		2.1.2 Regelmäßig bewässertes Ackerland
		2.1.3 Reisfelder
	2.2 Dauerkulturen	2.2.1 Weinbauflächen
		2.2.2 Obst- und Beerenobstbestände
		2.2.3 Olivenhaine
	2.3 Grünland	2.3.1 Wiesen und Weiden
	2.4 Landwirtschaftliche Flächen heterogener Struktur	2.4.1 Einjährige Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen
		2.4.2 Komplexe Parzellenstrukturen / Kleingärten
		2.4.3 Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe
		2.4.4 Land- und forstwirtschaftliche Flächen
3 Wälder und naturnahe Flächen	3.1 Wälder	3.1.1 Laubwälder
		3.1.2 Nadelwälder
		3.1.3 Mischwälder
	3.2 Strauch- und Krautvegetation	3.2.1 Natürliches Grünland
		3.2.2 Heiden und Moorheiden
		3.2.3 Hartlaubbewuchs
		3.2.4 Wald-Strauch-Übergangsstadien
	3.3 Offene Flächen ohne oder mit geringer Vegetation	3.3.1 Strände, Dünen und Sandflächen
		3.3.2 Felsflächen ohne Vegetation
		3.3.3 Flächen mit spärlicher Vegetation
		3.3.4 Brandflächen
		3.3.5 Gletscher und Dauerschneegebiete
4 Feuchtflächen	4.1 Feuchtflächen im Landesinnern	4.1.1 Sümpfe
		4.1.2 Torfmoore
	4.2 Feuchtflächen an der Küste	4.2.1 Salzwiesen
		4.2.2 Salinen
		4.2.3 In der Gezeitenzone liegende Flächen
5 Wasserflächen	5.1 Wasserflächen im Landesinnern	5.1.1 Gewässerläufe
		5.1.2 Wasserflächen
	5.2 Meeresgewässer	5.2.1 Lagunen
		5.2.2 Mündungsgebiete
		5.2.3 Meere und Ozeane

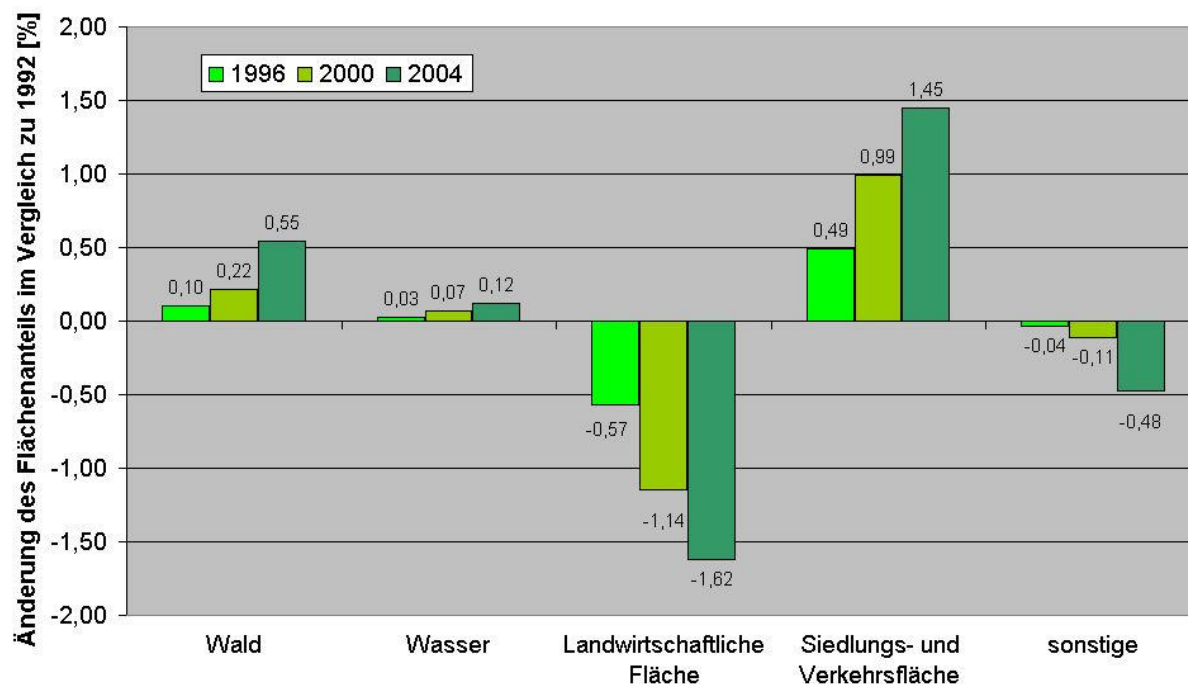
(kursiv dargestellte Klassen kommen in der BRD nicht vor oder sind nicht gesondert ausgewiesen)

Der Anteil der CORINE-Landnutzungskategorien an der Gesamtfläche der Bundesrepublik ist in Bild 3-1 zusammengefasst.



**Bild 3-1** Anteil der Landnutzungsarten an der Gesamtfläche der Bundesrepublik unterteilt nach der CORINE-Nomenklatur, Stand 31.12.2004 [Statistisches Bundesamt 2006] (Angaben in Klammern: Nomenklatur gemäß CORINE-Daten Ebene 1)

Die Landnutzung befindet sich in einem ständigen Wandel. Die für den Einzelnen in seinem täglichen Umfeld nur geringen sichtbaren Änderungen summieren sich bundesweit zu erheblichen Flächen. So wächst die Siedlungs- und Verkehrsfläche seit Jahrzehnten zulasten der land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen an. Der Zuwachs lag im Durchschnitt der Jahre 2001 bis 2004 bei 115 ha/Tag [Statistisches Bundesamt 2006]. Die prozentualen Änderungen ausgewählter Landnutzungsarten sind in Bild 3-2 aufgeführt.



**Bild 3-2** Änderungen der Landnutzungsarten, Basisjahr 1992 [Statistisches Bundesamt 2006]

In der vorliegenden Arbeit wird aufgrund der Zielstellung der Untersuchung kleiner Baugebiete eine flächengenaue Unterteilung auf der Basis der tatsächlichen Oberflächen vorgenommen. Die 44 CORINE-Landnutzungsklassen der Ebene 3 sind dazu innerhalb bebauter Gebiete zu großräumig gegliedert, da die Unterscheidung nur hinsichtlich der Nutzung der Flächen ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Anteile verschiedener Oberflächenarten erfolgt. Andere Landnutzungsklassen sind in der Bundesrepublik gar nicht vorhanden (z.B. 2.1.3 Reisfelder, 3.2.3 Hartlaubbewuchs) oder für die geplanten Untersuchungen nicht relevant (z.B. 3.3.5 Gletscher und Dauerschneegebiete, 4.11 Sümpfe).

Auf der Basis der Landnutzungsarten der CORINE-Klassifikation wurde deshalb ein neuer Katalog zur Unterteilung der Oberflächen in bebauten und unbebauten Gebieten erarbeitet, der in Tabelle 3-2 dargestellt ist.

Aus der CORINE-Klassifikation werden die Kategorien

- (1) Bebaute Flächen
- (2) Landwirtschaftliche Flächen
- (3) Wälder und naturnahe Flächen
- (5) Wasserflächen

beibehalten. Die Kategorie (4) - Feuchtgebiete - mit nicht relevanten Gruppen, wie Meeressgewässer und Feuchtflächen (Salzwiesen, Sümpfe, Torfmoore), entfällt.

Die Landnutzungskategorien werden hinsichtlich der Verdunstungseigenschaften ihrer Oberflächen weiter unterteilt in 9 Gruppen und 32 Landnutzungsarten. Für Flächen außerhalb bebauter Gebiete kann die Gruppenbezeichnung der CORINE-Klassifikation übernommen werden. Innerhalb bebauter Gebiete erfolgt eine neue Unterteilung anhand der tatsächlichen Oberflächen.

Die befestigten Oberflächen von Straßen, Wegen und Plätzen (Landnutzungsarten Nr. 2 - 5) werden entsprechend der von Glugla et al. [1999] für den Umweltatlas Berlin vorgeschlagenen Belagsklassen BK 1 - 4 unterteilt. Diese Einteilung hat den Vorteil, dass nicht jede einzelne der unterschiedlichen Straßen- und Wegebefestigungen im Berechnungsverfahren separat erfasst werden muss. Neue oder nur in geringem Umfang vorhandene Befestigungen können anhand ihrer hydrologischen Eigenschaften in die entsprechende Belagsklasse eingeordnet werden. Die Gefahr, dass durch die große Vielzahl unterschiedlicher Beläge die Übersichtlichkeit des Verfahrens leidet, wird somit vermieden.

Offene Flächen mit spärlicher Vegetation und vegetationslose Böden (Landnutzungsarten Nr. 27 - 29) sind in unserem Klimagebiet die Ausnahme und kommen in natürlichen Gebieten nur auf Felsen, Dünen oder auf neu entstandenen Abtragsflächen, wie zum Beispiel Uferabbrüchen, vor. Letztere Flächen werden, genau wie die in Siedlungsgebieten durch Abbruch von Gebäuden geschaffenen Brachflächen, durch Gräser und andere kleine Pflanzen bereits

innerhalb einer Vegetationsperiode wieder besiedelt. Der Anteil dieser Flächen an der Gesamtfläche des Landes ist nach UBA [2003] kleiner 1 %.

**Tabelle 3-2** Katalog der Landnutzungsarten  
(Angaben in Klammern: Nomenklatur gemäß CORINE-Landnutzungsdaten)

Nr.	Ebene 1 - Kategorien	Ebene 2 - Gruppen	Ebene 3 - Arten
1	Bebaute Flächen (1)	Versiegelte Flächen (Dachflächen, Straßen, Wege, Plätze)	Dachflächen
2			Belagsklasse 1 (Asphalt, Beton)
3			Belagsklasse 2 (Großpflaster, Betonverbundpflaster, Plattenbeläge mit Kantenlängen >8 cm)
4			Belagsklasse 3 (Kleinpflaster, Mosaikpflaster, Plattenbeläge mit Kantenlängen <8 cm)
5			Belagsklasse 4 (Rasengitterstein, Schotterrasen)
6		Bewachsene Flächen in bebauten Gebieten	Parkanlage
7			Sträucher, Büsche
8			Wiese, Rasen
9			Einzelbäume
10			Gründach, extensiv, Aufbau bis 10 cm Stärke
11			Gründach, extensiv, Aufbau >10 bis 20 cm Stärke
12			Gründach, intensiv, Aufbau >20 bis 50 cm Stärke
13			Gründach, intensiv, Aufbau >50 cm Stärke
14			Fassadenbegrünung
15			Versickerungsmulden
16			Komplexe Parzellenstrukturen / Kleingärten (2.4.2)
17	Landwirtschaftliche Flächen (2)	Ackerflächen (2.1)	Ackerland (2.1.1)
18		Dauerkulturen (2.2)	Weinbauflächen (2.2.1)
19			Obst- und Beerenobstbestände (2.2.2)
20		Grünland (2.3)	Wiesen und Weiden (2.3.1)
21	Wälder und naturnahe Flächen (3)	Wälder (3.1)	Laubwälder (3.1.1)
22			Nadelwälder (3.1.2)
23			Mischwälder (3.1.2)
24		Strauch- und Krautvegetation (3.2)	Natürliches Grünland (3.2.1)
25			Heiden und Moorheiden (3.2.2)
26			Wald-Strauch-Übergangsstadien (3.2.4)
27		Offene Flächen ohne oder mit geringer Vegetation (3.3)	Strände, Dünen und Sandflächen (3.3.1)
28			Felsflächen ohne Vegetation (3.3.2)
29			Flächen mit spärlicher Vegetation (3.3.3)
30	Wasserflächen (5)	Wasserflächen im Landesinnern (5.1)	Stehende Gewässer (5.1.2)
31			Wasserflächen mit Wasserpflanzen
32			Fließgewässer (5.1.1)

### 3.2 Berechnung der Wasser- und Energiebilanz

Die Wasser- und Energiebilanzen der in Tabelle 3-2 dargestellten Landnutzungsarten wurden ausgehend von den klimatischen Bedingungen am Standort und den Eigenschaften der Oberflächen auf der Basis langjähriger Mittelwerte unter Verwendung des BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahrens und eigener Ansätze berechnet. Eine Übersicht zum Verfahrensablauf zeigt Bild 3-3.

Als erster Schritt sind die von der Landnutzung unabhängigen Daten zu ermitteln. Diese umfassen die Klima- und Strahlungsdaten des Standorts.

Die benötigten Klimadaten korrigierter Jahresniederschlag  $P_{\text{korrr}}$ , Niederschlag im Sommerhalbjahr  $P_{\text{korrr, SHJ}}$  und potenzielle Verdunstung als Gras-Referenzverdunstung  $ET_0$  sind im Hydrologischen Atlas von Deutschland [BMU 2001] zusammengestellt.

Die für die Energiebilanz erforderlichen Strahlungsdaten - astronomisch mögliche Sonnenscheindauer  $S_0$  und extraterrestrische Strahlung  $R_0$  - sind nur von der geografische Breite abhängig und können aus Tabellen entnommen (zum Beispiel DWA Merkblatt M238 Tafel 9.4a und 9.6 [DWA 1996]) oder berechnet werden. Die Ausgangsdaten Lufttemperatur  $T$  und die tatsächliche Sonnenscheindauer  $S$  gehören zu den Standardmesswerten der Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes. Diese Werte stehen als langjährige Monatsmittel des Zeitraums 1961 - 1990 auf der Webseite des Deutschen Wetterdienstes frei zur Verfügung ([www.dwd.de](http://www.dwd.de) Klimadaten). Die Lufttemperatur kann für 672 Stationen und die tatsächliche Sonnenscheindauer für 469 Stationen abgerufen werden. Sofern am Standort keine eigenen Daten vorliegen, kann in den meisten Fällen mit ausreichender Genauigkeit mit den Werten einer benachbarten Wetterstation gerechnet werden.

Daten zum Wind und zur relativen Luftfeuchtigkeit  $U$  werden ebenfalls vom Deutschen Wetterdienst erfasst und bereitgestellt. Online sind jedoch nur die Daten von 44 bundesweit verteilten Stationen kostenlos verfügbar. Die Daten weiterer Stationen sind beim Deutschen Wetterdienst auf Anfrage gegen Entgelt erhältlich.

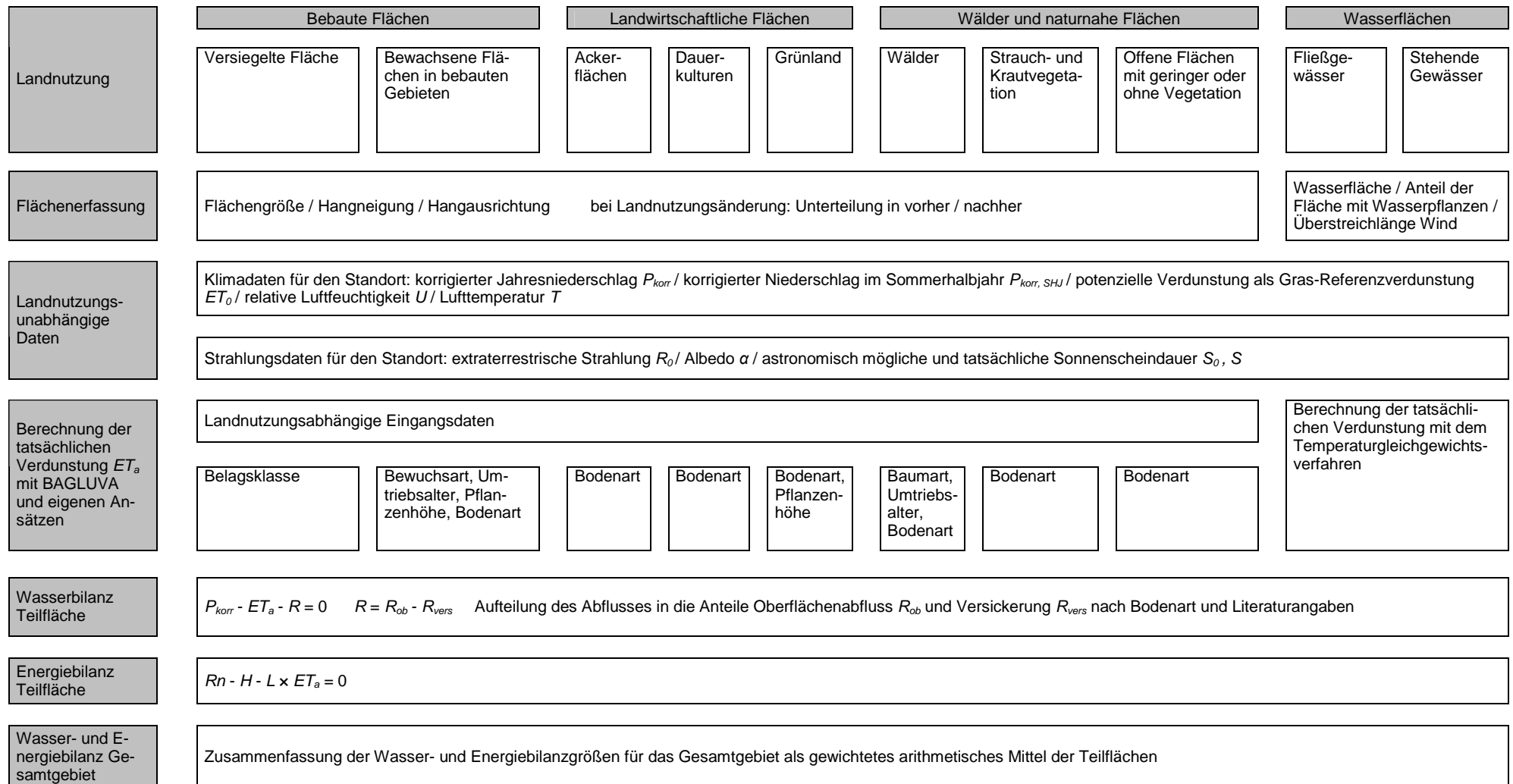


Bild 3-3

Schema des Verfahrensablaufs zur Ermittlung der Wasser- und Energiebilanzen in Abhängigkeit von der Landnutzung

Als zweiter Schritt sind die landnutzungsabhängigen Daten der Teilflächen zu erfassen. Dazu sind entsprechend der jeweiligen Nutzung zu erfassen: Belagsklasse bei versiegelten Flächen, Pflanzenart, Umtriebsalter bei Bäumen, Pflanzenhöhe bei Grünland sowie die Bodenart bei bewachsenen und vegetationslosen Flächen.

Für die Energiebilanz wird zudem die Albedo der Oberfläche benötigt.

Im dritten Schritt wird aus diesen Eingabedaten mit den im BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren implementierten und den zusätzlich erarbeiteten Ansätzen die tatsächliche Verdunstung  $ET_a$  der Landflächen berechnet. Die Evaporation der Wasserflächen wird mithilfe des Temperaturgleichgewichtsverfahrens bestimmt.

Die Aufstellung der Wasserbilanz erfolgt im vierten Schritt. Dazu wird der Gesamtabfluss  $R_{ges}$  mit dem Eingangswert korrigierter Jahresniederschlag  $P_{korr}$  und der berechneten tatsächlichen Evapotranspiration  $ET_a$  aus der Beziehung  $R_{ges} = P_{korr} - ET_a$  ermittelt.

Der Gesamtabfluss  $R_{ges}$  teilt sich auf in die Versickerung  $R_{vers}$  und den Oberflächenabfluss  $R_{ob}$ . Diese Aufteilung erfolgt prozentual anhand der Eigenschaften des anstehenden Bodens und der Landnutzungsart. Die im Verfahren angewandte Aufteilung ist in Tabelle 3-3 aufgeführt. Sie basiert auf der Auswertung von Literaturangaben.

Tabelle 3-3 Prozentuale Aufteilung des Gesamtabflusses  $R_{ges}$  auf Versickerung  $R_{vers}$  und Oberflächenabfluss  $R_{ob}$

Nr.	Landnutzungsart	$R_{vers}$	$R_{ob}$	Nr.	Landnutzungsart	$R_{vers}$	$R_{ob}$
1	Dachfläche	-	100	16	Kleingärten	90	10
2	Versiegelte Fläche, BK1	10	90	17	Ackerland	95	5
3	Versiegelte Fläche, BK2	30	70	18	Weinbau	70	30
4	Versiegelte Fläche, BK3	60	40	19	Obst / Beerenobstbestände	90	10
5	Versiegelte Fläche, BK4	80	20	20	Wiesen und Weiden	95	5
6	Parkanlage	99	1	21	Laubwald	99	1
7	Sträucher und Büsche	90	10	22	Nadelwald	99	1
8	Wiesen und Rasen	90	10	23	Mischwald	99	1
9	Einzelbäume	90	10	24	Natürliches Grünland	95	5
10	Gründach extensiv 10 cm	-	100	25	Heiden und Moorheiden	95	5
11	Gründach extensiv 20 cm	-	100	26	Wald-Strauch-Übergang	97	3
12	Gründach intensiv 50 cm	-	100	27	Strände Dünen Sand	90	10
13	Gründach intensiv >50 cm	-	100	28	Felsflächen ohne Vegetation	0	100
14	Fassadenbegrünung	80	20	29	Spärliche Vegetation	90	10
15	Versickerungsmulde	99	1				

Im fünften Schritt wird die Energiebilanz der Teilfläche berechnet. Die Energiebilanzgleichung lautet:

$$R_n - G - H - L \times ET_a = 0$$

Die Eingangsgröße ist die an der Oberfläche ankommende Nettostrahlung  $R_n$ . Diese ergibt sich aus der Globalstrahlung  $R_G$  abzüglich der kurzwelligen Reflexion der Oberfläche und der

Differenz aus langwelliger Abstrahlung der Oberfläche und Gegenstrahlung der Atmosphäre. Die Globalstrahlung  $R_G$  an der Oberfläche wird ausgehend von der extraterrestrischen Strahlung  $R_0$  und dem Verhältnis von tatsächlicher Sonnenscheindauer  $S$  zu astronomisch möglicher Sonnenscheindauer  $S_0$  ermittelt:

$$R_G = R_0 \times \left( 0,19 + 0,55 \frac{S}{S_0} \right)$$

Die kurzwellige Reflexion  $R_R$  ergibt sich aus der Albedo  $\alpha$  der Oberfläche:

$$R_R = R_G \times (1 - \alpha)$$

Die von der Oberfläche absorbierte kurzwellige Strahlung erwärmt diese und führt zu einer von der Oberflächentemperatur abhängigen langwelligen Abstrahlung. Die effektive langwellige Ausstrahlung  $Rn_L$  als Differenz zwischen der langwelligen Ausstrahlung der Oberfläche und der langwelligen Gegenstrahlung der Atmosphäre beträgt:

$$Rn_L = \varepsilon \times \sigma \times (T + 273,15)^4 \times (0,56 - 0,08 \times \sqrt{e}) \times \left( 0,1 + 0,9 \times \frac{S}{S_0} \right)$$

mit  $\varepsilon \dots$  Emissionskoeffizient, Wasser:  $\varepsilon = 0,97$  andere Oberflächen:  $\varepsilon = 1$

$\sigma \dots$  Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma = 0,4918 \times 10^{-6} \text{ J/(cm}^2 \times \text{K}^4)$

$e \dots$  Dampfdruck der Luft

$$e = e_s(T) \times \frac{U}{100}$$

$e_s(T) \dots$  Sättigungsdampfdruck bei Lufttemperatur [hPa]

$U \dots$  relative Luftfeuchtigkeit [%]

Die Nettostrahlung  $Rn$  errechnet sich damit aus:

$$Rn = R_R - Rn_L$$

Der Bodenwärmestrom  $G$  gleicht sich im langjährigen Mittel aus und kann deshalb bei der Verwendung von langjährigen Mittelwerten als vernachlässigbar klein angenommen werden.

Der fühlbare Wärmestrom  $H$  ist die mit der erwärmten Luft abtransportierte Wärmemenge.

$$H = \gamma \times L \times f(v) \times (T_o - T_L)$$

$\gamma \dots$  Psychrometerkonstante  $\gamma = 0,65 \text{ hPa/K}$

$L \dots$  spezifische Verdampfungswärme des Wassers [MJ/kg]

$f(v) \dots$  Funktion der Windgeschwindigkeit [m/s]

$T_o \dots$  Oberflächentemperatur [°C]

$T_L \dots$  Lufttemperatur [°C]

Alle Schritte sind jeweils für Teilflächen mit gleicher Landnutzungsart auszuführen. Für die Berechnung der mittleren Gesamtbilanz eines Untersuchungsgebietes wird nach Dyck und Peschke [1995] für alle Komponenten das mit der Teilflächengröße gewichtete arithmetische Mittel der Beträge der Teilflächen ermittelt. Die mittlere tatsächliche Verdunstung  $ET_a^{ges}$  wird



beispielsweise berechnet mit:

$$ET_a^{ges} = \frac{1}{A_{ges}} \sum_{i=1}^k A_i \times ET_{a_i}$$

mit:  $ET_a^{ges}$  mittlere tatsächliche Verdunstung des Gesamtgebietes [mm/a]

$ET_{a,i}$  mittlere tatsächliche Verdunstung der Teilfläche i [mm/a]

$A_{ges}$  Gesamtfläche [m<sup>2</sup> oder ha]

$A_i$  Teilfläche [m<sup>2</sup> oder ha]

$k$  Anzahl der Teilflächen

Alle anderen Komponenten der Bilanzen werden analog ermittelt.

Die Wasser- und Energiebilanzen der einzelnen Landnutzungsarten und deren Besonderheiten werden in den Kapiteln 3.3 "Wasser- und Energiebilanz un bebauter Gebiete" und 3.4 "Wasser- und Energiebilanz bebauter Gebiete" erläutert.

Jedem Abschnitt ist eine Grafik der Wasser- und Energiebilanz der jeweiligen Landnutzungsart vorangestellt. Diese Bilanzen wurden für einen fiktiven Standort in der Bundesrepublik mit fiktiven mittleren Standortbedingungen aufgestellt. Die von der geografischen Breite abhängigen Strahlungsdaten entsprechen 51° nördlicher Breite und damit der geografischen Mitte Deutschlands in Nord-Süd-Richtung. Die Niederschlagsdaten sind Mittelwerte für das Territorium der Bundesrepublik aus dem Zeitraum 1961 - 1990. Die Grafiken stellen das prinzipielle Verhalten der Oberflächen im Wasser- und Energiehaushalt dar. In Abhängigkeit von den tatsächlichen klimatischen Standortbedingungen und der anstehenden Bodenart sind für reale Standorte deutliche Abweichungen von den mittleren Bilanzen möglich. Die angenommenen Werte sind in Bild 3-4 zusammengestellt.

Klimadaten	Niederschlag
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mittlerer korrigierter Niederschlag BRD 1961 - 1990: 859 mm/a</li> <li>- Mittlerer korrigierter Niederschlag im Sommerhalbjahr: 459 mm/a</li> </ul>
	Verdunstung
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Landflächen: Tatsächliche Verdunstung der Landnutzungsart, berechnet auf der Basis der mittleren Gras-Referenzverdunstung aus dem Hydrologischen Atlas von Deutschland von 600 mm/a</li> <li>- Wasserflächen: Tatsächliche Verdunstung berechnet nach dem Temperaturgleichgewichtsverfahren mit Monatsmittelwerten für den Zeitraum 1961 - 1990</li> </ul>
Strahlungsdaten	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mittelwert von 20 Klimastationen auf 51° nördlicher Breite (entspricht einem Streifen vom Raum Köln / Düsseldorf über Kassel, Erfurt, Leipzig, Dresden bis nach Görlitz)</li> </ul>
Landnutzungsabhängige Daten	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bodenart: lehmiger Sand mit einer Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität von 17,5% (nicht bei versiegelten Flächen)</li> <li>- Umtriebsalter: 100 Jahre bei Nadelwald, 150 Jahre bei Laubwald</li> <li>- Pflanzenhöhe bei Grünland: 20 cm</li> <li>- Grundwasserflurabstand: 2 m</li> </ul>

Bild 3-4

Ausgangswerte zur Erstellung der Grafiken der Wasser- und Energiebilanzen der verschiedenen Landnutzungsarten für einen angenommenen fiktiven mittleren Standort in der Bundesrepublik Deutschland

Die Grafiken stellen die vereinfachte Wasser- und Energiebilanz für die jeweilige Landnutzungsart auf der Basis langjähriger Jahresmittelwerte dar. Der Bodenwärmestrom  $G$ , dessen Richtung im Jahresverlauf wechselt, wird nicht mit dargestellt, da sich die unterschiedlich gerichteten Energieströme im langjährigen Mittel ausgleichen. Der Betrag der langwelligen Ausstrahlung der Oberfläche  $R_{L, E-A}$ , der durch die langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre ausgeglichen wird, ist in den einzelnen Grafiken ebenfalls nicht mit abgebildet.

Bei der Berechnung der effektiven langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass die Temperatur der Oberfläche der mittleren Lufttemperatur entspricht. Abweichungen, die zum Beispiel bei versiegelten Flächen bei starker Sonneneinstrahlung und durch eine hohe Wärmespeicherkapazität entstehen, sind nicht berücksichtigt. Bei Wasserflächen wird im Temperaturgleichgewichtsverfahren die aus der Lufttemperatur ermittelte Temperatur der Wasseroberfläche für die Berechnung der effektiven langwelligen Ausstrahlung genutzt.

Die Legende der in den Wasser- und Energiebilanzen verwendeten Abkürzungen zeigt Bild 3-5.

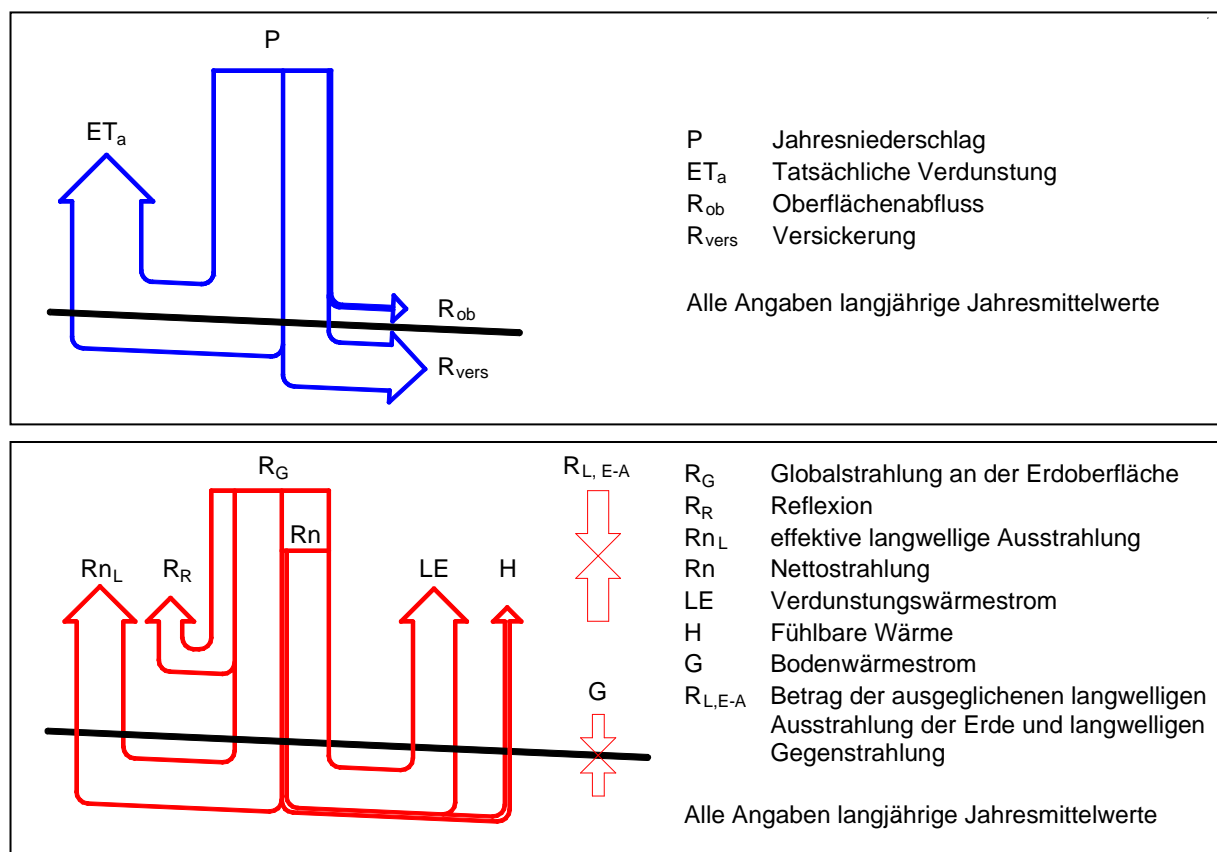


Bild 3-5

Legende zu den Grafiken der Jahreswasser- und Jahresenergiebilanzen für die verschiedenen Landnutzungsarten in den Kapiteln 3.3 und 3.4

### 3.3 Wasser- und Energiebilanz unbebauter Gebiete

Die Angaben zur Verdunstungshöhe von Flächen unbebauter Gebiete werden benötigt, um die Veränderungen der Verdunstung infolge der Bebauung von Gebieten zu ermitteln. Trotz der hohen Siedlungsdichte in der Bundesrepublik stellen bewachsene Flächen mit 83 % der Gesamtfläche den mit Abstand höchsten Anteil der Flächennutzung dar.

Die Versiegelung neuer Flächen erfolgt hauptsächlich auf vorher landwirtschaftlich genutzten Flächen und zu einem geringen Teil auf Waldflächen [UBA 2003]. In Sachsen werden beispielsweise 70 % der Bauvorhaben auf bisher landwirtschaftlich genutzten Flächen und nur 14 % auf Flächen, die bereits bebaut waren, ausgeführt [SMUL 2002].

Der Begriff „natürliche Flächen“ wurde bewusst vermieden, da es sich bei den unbebauten Flächen bis auf wenige Ausnahmen um Kulturlächen handelt, die im Laufe der Jahrhunderte grundlegend verändert wurden. Unsere heutigen Wälder und Grünlandflächen sind weit vom ursprünglichen natürlichen Zustand entfernt.

Für unbebaute Gebiete werden die Oberflächen entsprechend ihrer Landnutzung untergliedert in:

- Landwirtschaftliche Flächen
  - Ackerflächen
  - Dauerkulturen
  - Grünland
- Wälder und naturnahe Flächen
  - Wälder
  - Strauch- und Krautvegetation
  - Offene Flächen ohne oder mit geringer Vegetation
- Wasserflächen
  - Stehende Gewässer
  - Wasserflächen mit Wasserpflanzen
  - Fließgewässer

### 3.3.1 Landwirtschaftliche Flächen

Die Landnutzungskategorie „Landwirtschaftliche Fläche“ umfasst die Landnutzungsarten

- Ackerflächen
- Dauerkulturen
  - Weinbauflächen
  - Obst- und Beerenobstbestände
- Grünland

Die Dauerkulturen „Weinbauflächen“ sowie „Obst- und Beerenkulturen“ werden aufgrund ihres sehr geringen Flächenanteils nicht näher behandelt. Im BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren erfolgt die Berechnung der Verdunstung dieser Landnutzungsarten mit dem Ansatz „Laubwald“ und einem Umtriebsalter von 25 Jahren für Weinbauflächen und 20 Jahren für Obst- und Beerenobstkulturen.

#### Ackerflächen

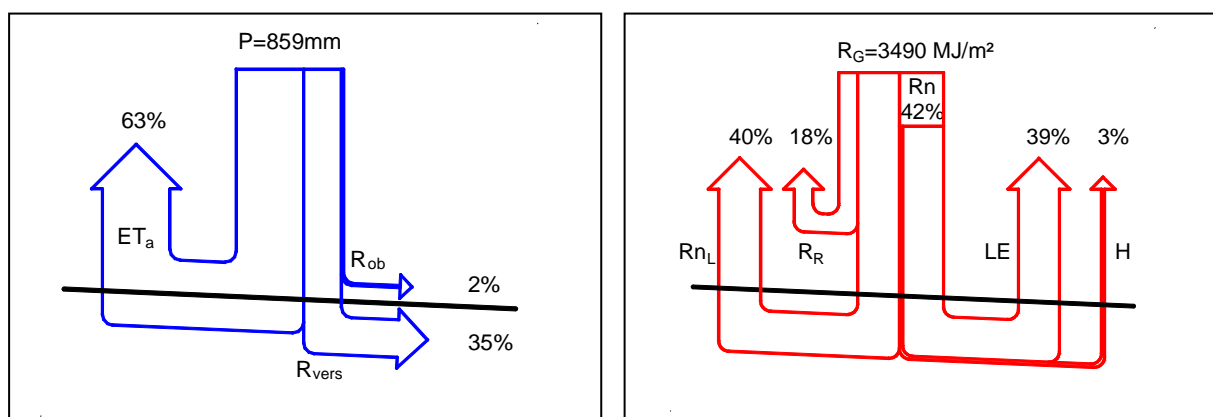


Bild 3-6 Jahreswasserbilanz  
(Legende und Erläuterungen - siehe Seite 60)

Jahresenergiebilanz

Der Anteil landwirtschaftlicher Flächen an der Gesamtfläche der BRD beträgt 53 % und umfasst eine Fläche von insgesamt 189 300 km<sup>2</sup> [Statistisches Bundesamt 2006]. Davon sind etwa 63 % (119 300 km<sup>2</sup>) Ackerflächen.

Landwirtschaftliche Flächen werden am meisten für die Erschließung neuer Baugebiete in Anspruch genommen. In den Jahren 1992 bis 2004 wurde dadurch der Anteil landwirtschaftlicher Flächen an der Gesamtfläche der Bundesrepublik von 54,6 % auf 53,0 % reduziert.

Die Verdunstung von Ackerflächen wird neben den klimatischen und geologischen Standortbedingungen besonders durch die Pflanzenart und die jahreszeitlichen Phasen des Pflanzenwachstums bestimmt. Im Vergleich zu anderen bewachsenen Flächen ist der Einfluss der

jahreszeitlichen Phasen bei Ackerflächen am größten, da diese Flächen jährlich die Phasen - Aussaat, Wachsen, Reifen, Ernte, Winterruhe - durchlaufen. Ihre höchste Verdunstungsleistung erreichen Ackerflächen am Ende der Wachstums- und am Anfang der Reifephase. Im Laufe der Reifephase geht die Verdunstungsleistung langsam zurück und wird mit der Ernte abrupt bis auf die verbleibende geringe Verdunstung der Bodenschicht reduziert. Dieser Jahresgang wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass die Phasen der größten Pflanzenentwicklung mit dem Jahresmaximum der Sonnenstrahlung übereinstimmen.

Über voll entwickelten landwirtschaftlichen Beständen können an Sommertagen bei hoher Energiezufuhr und nach stärkeren Niederschlägen Verdunstungshöhen bis 14 mm/d erreicht werden [DWA 2002]. Für diese hohe Verdunstungsleistung ist jedoch eine zusätzliche advektive Energiezufuhr erforderlich. In den Wintermonaten erfolgt auf den Feldern nur die Verdunstung aus der Streuschicht oder dem ja nach Pflanzenart vorhandenen niedrigen Krautbewuchs.

Die jährlich wechselnde Fruchtfolge mit teilweise deutlichen Unterschieden in der Verdunstungshöhe der einzelnen Ackerkulturen bringt zusätzlich erhebliche Abweichungen in der Jahresbilanz. In den im Verfahren eingesetzten langjährigen Jahresmittelwerten sind diese Abweichungen berücksichtigt.

Der überwiegende Anteil des von den Pflanzen aufgenommenen Wassers wird für die Transpiration und damit die Transportprozesse in den Pflanzen benötigt. Das Verhältnis der Transpirationsmenge zur Menge des beim Biomasseaufbau umgesetzten Wassers ist abhängig von der Pflanzenart und liegt zwischen 100:1 und 1000:1 [Hellie 2004].

Die mittlere jährliche Albedo für Ackerflächen beträgt je nach Boden- und Pflanzenart 0,15 bis 0,25 [Bronstert et al. 2001]. Die Albedo ändert sich im Jahresverlauf entsprechend den phänologischen Phasen und langjährig durch den Fruchtwechsel und die unterschiedlichen Eigenschaften der Pflanzenarten (Bild 3-7).

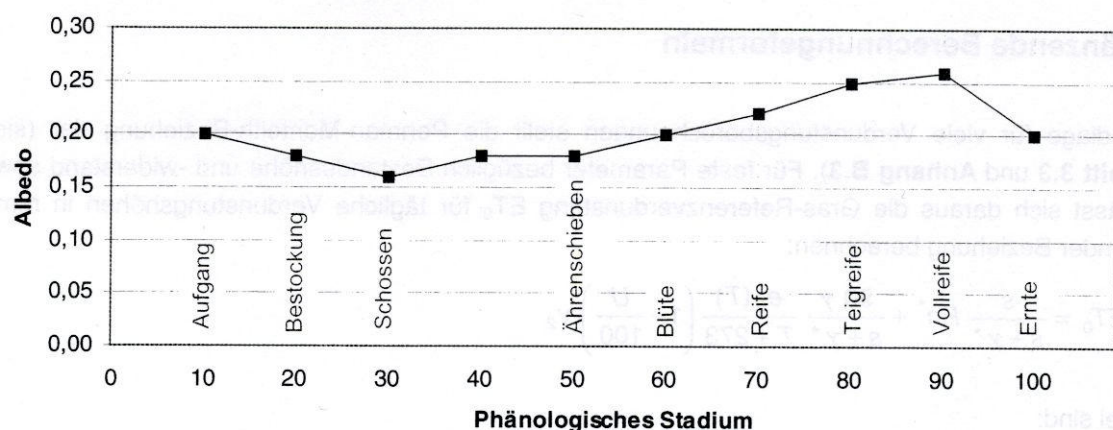


Bild 3-7

Jahresgang der Albedo am Beispiel Wintergetreide [DWA 2002]

Neben der hohen Albedo wird die Energiebilanz der Ackerflächen durch den großen Verdunstungswärmestrom bestimmt. Der überwiegende Teil der absorbierten Energie wird als latente Wärme und nur etwa ein Zehntel als fühlbare Wärme abgegeben.

Für die Berechnung des Wasser- und Energiehaushalts von Ackerflächen werden außer den Klima- und Strahlungsdaten als Eingangsdaten benötigt:

- Bodenart und deren Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität
- Grundwasserflurabstand
- zusätzlich bei bewässerten Flächen: jährliche Beregnungsmenge

Bisher nicht berücksichtigt ist der konservierende Ackerbau im Rahmen der umweltgerechten Landwirtschaft. In Sachsen beträgt dessen Anteil an der Ackerfläche etwa 30 % [LFL 2006]. Hier wird diese Art der Bodenbearbeitung seit 1993 gefördert. Der konservierende oder pfluglose Ackerbau nutzt nichtwendende Bodenbearbeitungsgeräte. Die verbleibende Mulchschicht und Zwischensaatens schützen die Oberfläche vor Verschlammung, dabei bleibt der Aufbau des Bodens weitgehend unverändert und Ernterückstände bleiben nahe an der Oberfläche.

Ziel des konservierenden Ackerbaus ist die Reduzierung der Bodenerosion durch Vermeidung der Verschlammung der Bodenporen. Der Oberflächenabfluss wird reduziert und gleichzeitig erhöhen sich die Infiltrationsfähigkeit und Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Als positiver Nebeneffekt steht mehr Niederschlagswasser für die Pflanzen, die Verdunstung und die Versickerung zur Verfügung. Die Wasserbilanz der Ackerflächen wird in Richtung der Bilanz natürlicher Flächen verschoben.

Perspektivisch ist mit einer Zunahme des konservierenden Ackerbaus zu rechnen. In weitergehenden Untersuchungen sind die Auswirkungen dieser Bearbeitungsart auf den Wasserhaushalt landwirtschaftlicher Flächen genauer zu erfassen.

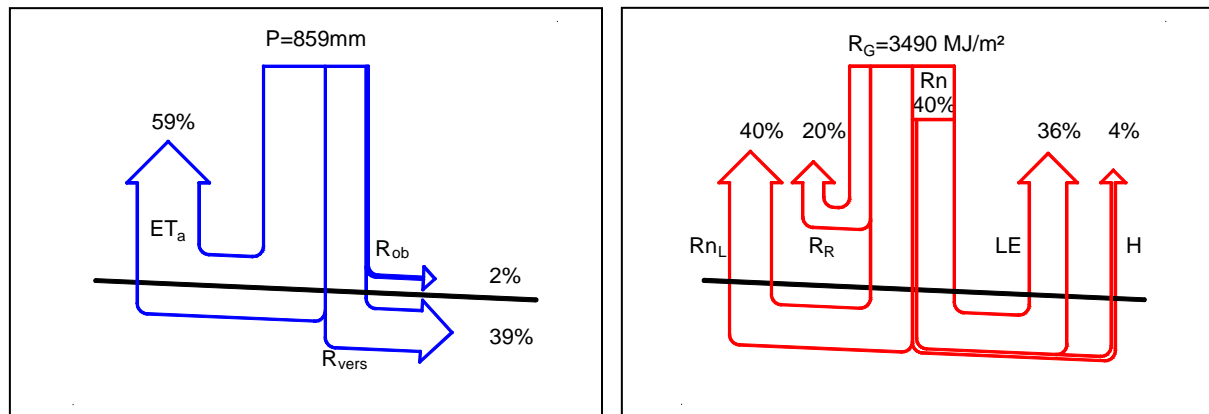
**Grünland**

Bild 3-8

Jahreswasserbilanz  
(Legende und Erläuterungen - siehe Seite 60)

Jahresenergiebilanz

Der Grünlandanteil in Form von Wiesen und Weiden beträgt etwa 32 % (60 600 km<sup>2</sup>) der landwirtschaftlichen Flächen der BRD und damit etwa 17 % der Gesamtfläche des Landes [Statistisches Bundesamt 2006].

Die Verdunstung dieser Flächen ist neben den klimatischen und geologischen Standortbedingungen stark von der Pflanzenhöhe und vom Grundwasserflurabstand abhängig.

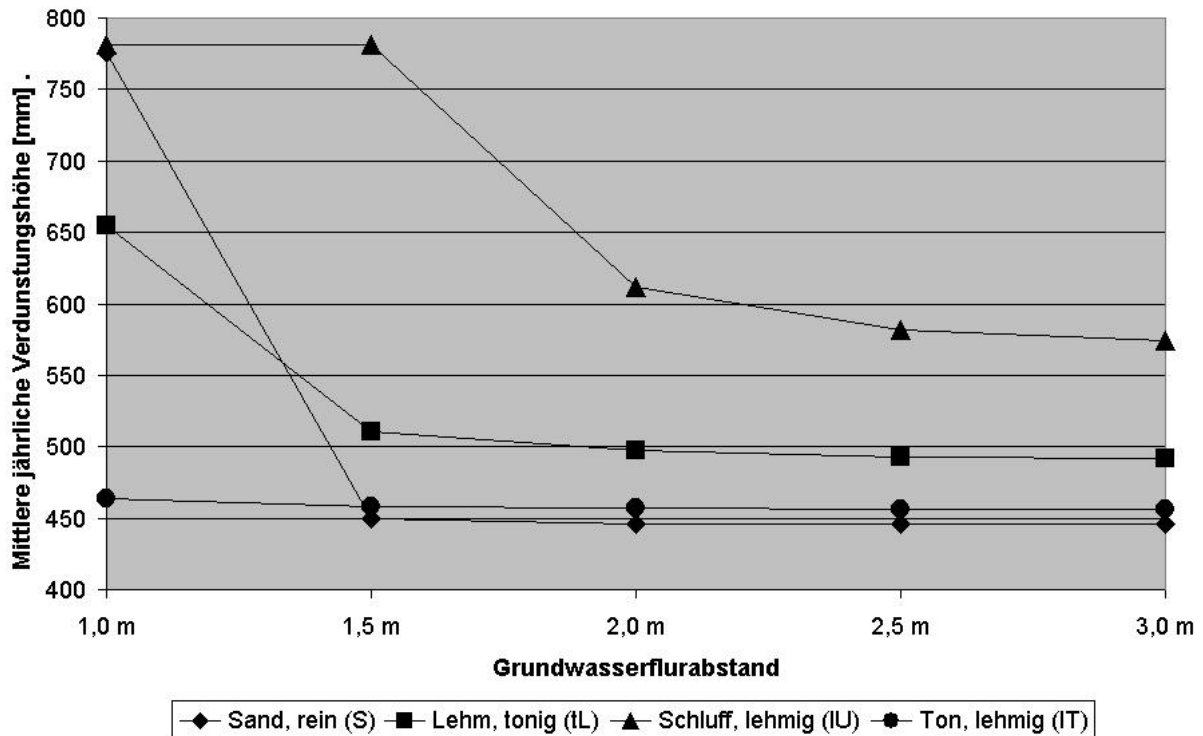
Die Verdunstungsleistung von Wiesen und Weiden ist geringer als bei Bäumen, Sträuchern und Ackerflächen. Ursache ist die geringe Pflanzenhöhe. Damit ist sowohl die Interzeptionsverdunstung als auch die Transpiration deutlich niedriger. Obwohl Grünlandflächen das gesamte Jahr mit Vegetation bedeckt sind, reicht die geringe Verdunstungsleistung im Winterhalbjahr nicht aus, um diese Differenz auszugleichen.

Die meisten Gräser sind Intensiv-Wurzler. Sie bilden dichte Wurzelfilze, die aber nur in geringe Tiefen von etwa 0,6 m reichen. Die effektive Durchwurzelungstiefe beträgt je nach Bodenart zwischen 0,25 und 0,5 m [Ad-hoc-AG Boden 2003]. Mit den dichten Wurzeln kann das Niederschlagswasser im Durchwurzelungsbereich gut zurückgehalten und aufgenommen werden. Die Erschließung von zusätzlichem Wasser bei fehlendem Niederschlag über den kapillaren Aufstieg aus tieferen Bodenschichten ist jedoch aufgrund der flachen Wurzeln nur gering. Dadurch ist die Menge des pflanzenverfügbaren Wasser gegenüber Pflanzen mit tiefreichenden Wurzeln eingeschränkt.

Die Wurzeldichte von Grasflächen schwankt im Jahresverlauf im Vergleich zu einjährigen Kulturen nur gering. Dennoch wird in der Hauptwachstumsphase in den Sommermonaten ein Maximum der Wurzeldichte erreicht.

Die Verdunstungshöhe von Grünland wird entscheidend vom Wasserspeichervermögen des Bodens bestimmt, da aufgrund der effektiven Durchwurzelungstiefe von maximal 0,5 m nur ein vergleichsweise geringer Speicherraum für die Wasserversorgung zur Verfügung steht.

Grünflächen auf grundwassernahen Standorten können erhebliche Wassermengen durch kapillar aufsteigendes Grundwasser aufnehmen und erreichen gegenüber trockenen Standorten eine höhere Verdunstungsleistung. In Bild 3-9 ist die Änderung der Verdunstungshöhe in Abhängigkeit vom Grundwasserflurabstand für die Hauptbodenarten angegeben.



**Bild 3-9** Mittlere jährliche Verdunstungshöhe von Grünland in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Grundwasserflurabstand, berechnet mit dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren

Die Schwankungen der Albedo im Jahresverlauf sind bei Grasflächen durch die ganzjährige Bodenbedeckung für den gleichen Standort geringer als bei Ackerflächen. Die Bodenart und damit verbunden die Wasserversorgung wirkt sich hier stärker auf die Albedo aus. Die mittlere jährliche Albedo für Grünland kann mit 0,2 angenommen werden [Bronstert et al. 2001].

Für die Berechnung des Wasser- und Energiehaushalts von Grünland werden neben den Klima- und Strahlungsdaten als Eingangsdaten benötigt:

- mittlere Pflanzenhöhe
- Bodenart und deren Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität
- Grundwasserflurabstand



### 3.3.2 Wälder und naturnahe Flächen

Die Landnutzungskategorie „Wälder und naturnahe Fläche“ umfasst die Landnutzungsarten

- Wälder
  - Laubwälder
  - Nadelwälder
  - Mischwälder
- Strauch- und Krautvegetation
  - Natürliches Grünland
  - Heiden und Moorheiden
  - Wald-Strauch-Übergangsstadien
- Offene Flächen ohne oder mit geringer Vegetation
  - Strände, Dünen und Sandflächen
  - Felsflächen ohne Vegetation
  - Flächen mit spärlicher Vegetation

Der Flächenanteil der Gruppen „Strauch- und Krautvegetation“ und „Offene Flächen ohne oder mit geringer Vegetation“ ist gering. In der CORINE-Landnutzungsdatenauswertung 2000 werden die Anteile an der Gesamtfläche der Bundesrepublik mit 1,2 % für „Strauch- und Krautvegetation“ und 0,2 % für „Offene Flächen ohne oder mit geringer Vegetation“ angegeben [Keil et al. 2005].

Die Ermittlung der Verdunstung dieser Landnutzungsarten erfolgt indirekt. Dazu werden die Flächen nach dem Ansatz aus dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren entsprechend der typischen Verteilung in die einzelnen Bestandteile der im Verfahren implementierten Landnutzungsarten aufgeteilt. Die angesetzten Landnutzungsarten und Prozentwerte sind in Bild 3-10 aufgeführt.

<b>Strauch- und Krautvegetation</b>		
Natürliches Grünland	100 % Grünland	mittlere Pflanzenhöhe: 12 cm
Heiden und Moorheiden	50 % Grünland	mittlere Pflanzenhöhe: 20 cm
	50 % Laubwald	Umtriebsalter: 50 Jahre
Wald - Strauch - Übergangsstadien	50 % Laubwald	Umtriebsalter: 15 Jahre
	50 % Nadelwald	Umtriebsalter: 10 Jahre
<b>Offene Flächen ohne oder mit geringer Vegetation</b>		
Strände, Dünen und Sandflächen	100 % vegetationslose Fläche	
Felsflächen ohne Vegetation	100 % versiegelte Fläche	
Flächen mit spärlicher Vegetation	80 % versiegelte Fläche	
	20 % Grünland	mittlere Pflanzenhöhe: 20 cm

Bild 3-10

Ansätze für die Berechnung der Landnutzungsarten „Strauch- und Krautvegetation“ und „Offene Flächen ohne oder mit geringer Vegetation“ im BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren [Glugla et al. 2003]

Ausgehend von den klimatischen und geologischen Daten des Standorts und den Algorithmen der jeweiligen Landnutzungsart werden die Verdunstungshöhen der Teilflächen berechnet und anschließend summiert.

### Wälder

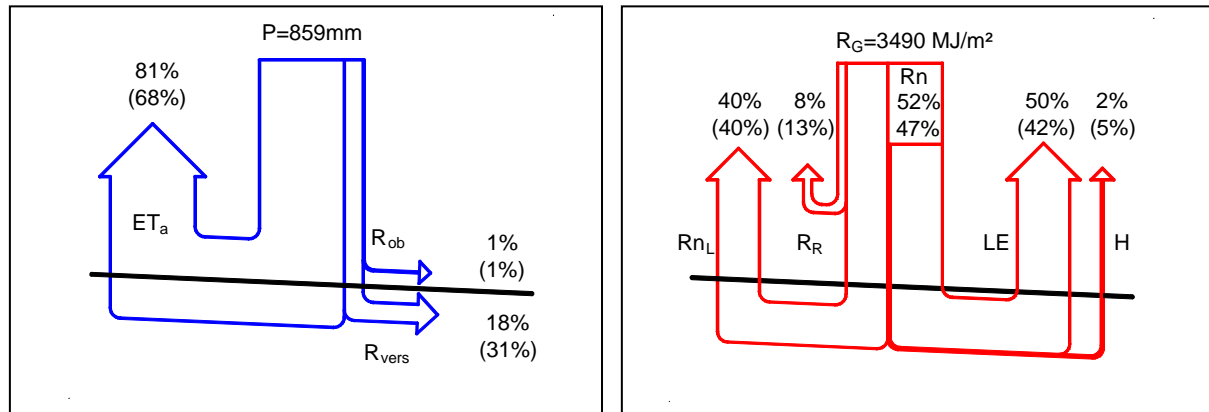


Bild 3-11 Jahreswasserbilanz  
Nadelwald: Angaben ohne Klammern, Laubwald: Angaben mit Klammern  
(Legende und Erläuterungen - siehe Seite 60)

Der Anteil der Wälder an der Gesamtfläche der BRD beträgt 29,8 % und umfasst eine Fläche von insgesamt 106 500 km² [Statistisches Bundesamt 2006]. Im Zeitraum 1992 - 2004 ist die als Wald ausgewiesene Fläche um 1 950 km² angewachsen. Dieser Zuwachs ist hauptsächlich ein statistischer Effekt und entstand durch die Auflösung der Nutzungskategorie „Militärisches Übungsgebiet“ und der Zuordnung eines Großteils dieser Flächen zur Kategorie Wald. Die tatsächliche Zunahme der Waldflächen war nur gering und stammt aus der Aufforstung stillgelegter landwirtschaftlicher Flächen und der Wiederherstellung von Bergbaufolgefächern. Waldflächen werden heute aufgrund der großen ökologischen Bedeutung nur zu einem geringen Anteil für neue Baugebiete genutzt. Bei größeren Erschließungsvorhaben sind jedoch regelmäßig auch Wälder betroffen.

Bei Wäldern wird fast der gesamte Niederschlag in Verdunstung und Versickerung aufgeteilt, da ein Oberflächenabfluss nur bei extremen Niederschlagsereignissen oder sehr steilen Einzugsgebieten auftritt. In der Jahresbilanz liegt der Oberflächenabfluss nur für wenige Standorte über 1 % des Jahresniederschlags.

Das trifft auch auf die heutigen forstwirtschaftlich genutzten Wälder zu. Dabei ist zu beachten, dass durch die anthropogene Beeinflussung die Wälder in Mitteleuropa weit von ihrem ursprünglichen natürlichen Charakter entfernt sind. Unbeeinflusste Naturwälder sind in Mitteleuropa nur noch in einigen wenigen Naturschutzgebieten, wie zum Beispiel im Hainich in Thüringen, vorhanden.

Ursache für den geringen Oberflächenabfluss ist die Zwischenspeicherung erheblicher Was-

sermengen durch Interzeption, in der Streuschicht, in der durchwurzelten Bodenschicht und in der Biomasse. In Abhängigkeit von der Baumart, dem anstehenden Boden und dem Geländere relief beträgt der Anteil der Versickerung 10 bis 40 % des Jahresniederschlags.

Baumart und Bestandsalter bestimmen die Verdunstungsleistung der Wälder. Im Altersverlauf wird das Maximum der Verdunstung im Dickungs- und angehenden Stangenholzal ter erreicht und sinkt im Alter allmählich wieder ab [Flemming 1978].

Wälder erzielen infolge der großen Blattoberfläche die höchsten Interzeptionsraten aller Pflanzen. Diese betragen für Laubwälder 15 bis 25 % und für Nadelwälder 20 bis 40 % des Jahresniederschlags. Bei dichtem Bodenbewuchs im Wald kommt zur Interzeption an den Bäumen noch die Interzeption an den Pflanzenteilen der Bodenschicht hinzu, so dass die Gesamtinterzeption um weitere 20 bis 40 % steigen kann [Flemming 1978:67].

Die Anteile der Verdunstungsarten an der Gesamtverdunstung der Wälder liegen in der Größenordnung von:

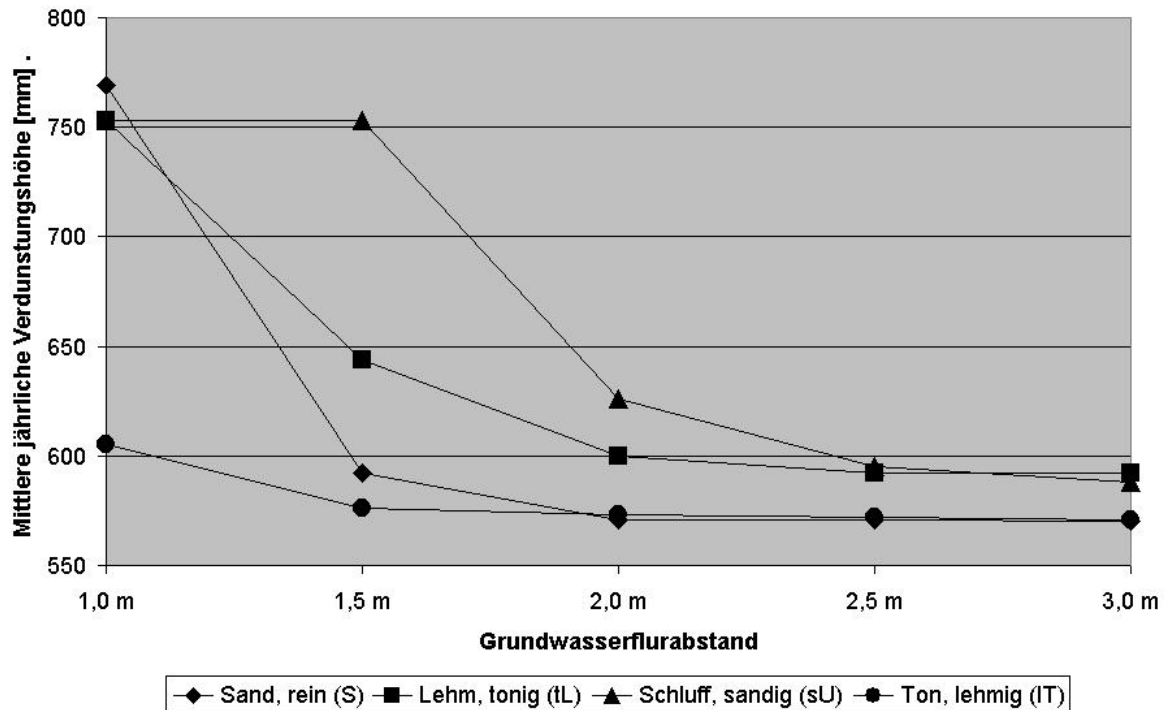
Transpiration	50 - 60 %
Interzeption	25 - 40 %
Bodenevaporation	5 - 10 %

Eine Besonderheit der Wälder ist die Wirkung des geschlossenen Bestandes. Sie entsteht durch die große Pflanzenmasse, der daraus resultierenden beträchtlichen Blattoberfläche und die große horizontale und vertikale Ausdehnung. Bei gleichen Klima- und Bodenbedingungen ist die Verdunstung von Wäldern gleichermaßen von der Strahlung und dem Sättigungsdefizit der Luft abhängig, während bei Ackerflächen und Grünland die Verdunstung hauptsächlich von der Strahlung abhängt. Ursache ist die viel bessere Kopplung zwischen verdunstender Oberfläche und Atmosphäre bei Waldflächen [DWA 2002]. Gleichzeitig transpirieren Wälder bei gleichen Bedingungen weniger als landwirtschaftliche Flächen, da durch die große Blattfläche das Sättigungsdefizit der Luft ausgeglichener ist.

Die Verdunstungsrate von Nadelwäldern erreicht unter gleichen Standortbedingungen die höchsten Werte aller Vegetationsflächen in unserem Klimagebiet. Nadelwälder haben zwar im Vergleich zu Laubwäldern eine geringere Verdunstung in den Sommermonaten, erbringen aber eine höhere jährliche Verdunstungsmenge, da auch in den Wintermonaten über die nicht abgeworfenen Nadeln die Transpiration stattfindet. Die mittleren Jahreswerte der Verdunstung von Buchen- und Kiefernwäldern im Nord-Osten Brandenburgs werden von Müller et al. [2001] mit 480 mm/a für Buchen und 575 mm/a für Kiefern angegeben.

Wie für alle Pflanzen ist auch bei Wäldern eine Abhängigkeit der Verdunstung von der Bodenart zu verzeichnen. Dabei ist die Verdunstung auf sandigen grundwasserfernen Standorten geringer als bei grundwassernahen oder bindigen Böden, da bei ersterem der Anteil des für die Pflanzen verfügbaren Wassers aufgrund der schnelleren Versickerung des Wassers in tiefere Schichten geringer ist. Ein hohes Grundwasser schöpfendes Vermögen haben

nach Larcher [1994:219] Pappeln. Dieser Effekt kann zur Erhöhung der Verdunstung und den Abbau von Staunässe genutzt werden. In Bild 3-12 ist die Abhängigkeit der Verdunstung von Laubwald von der Bodenart und dem Grundwasserflurabstand dargestellt. Bei Grundwasserflurabständen  $>2,5$  m kann nur noch wenig zusätzliches Wasser über den kapillaren Aufstieg entnommen werden, so dass das Wasserspeichervermögen des Bodens sich wieder stärker auf die Verdunstungshöhe auswirkt.



**Bild 3-12** Mittlere jährliche Verdunstungshöhe für Laubwald in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Grundwasserflurabstand, berechnet mit dem BAGLUA-Wasserhaushaltsverfahren

Im Vergleich zu anderen bewachsenen Flächen ist die Albedo von Nadelwäldern relativ niedrig. Damit ist die Reflexion niedriger und für die Verdunstung steht mehr Energie zur Verfügung. Die mittlere jährliche Albedo beträgt für Laubwälder 0,15 bis 0,20 und für Nadelwälder 0,05 bis 0,15 [Dyck und Peschke 1995]. Sie liegt damit zwischen den Werten für versiegelte Flächen und denen für Ackerflächen und Grünland. Die Angaben sind Jahresmittelwerte. Aufgrund des unterschiedlichen Einfallswinkels der Sonne und der Wachstumsphasen bestehen jahreszeitliche Unterschiede. Diese sind bei Laubwäldern infolge der kahlen Phase im Winterhalbjahr besonders ausgeprägt.

Für die Berechnung des Wasserhaushalts von Wäldern werden neben den Klimadaten als Eingangsdaten benötigt:

- Waldart (Laub- oder Nadelwald)
- Umtriebsalter
- Bodenart und deren Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität
- Grundwasserflurabstand

### 3.3.3 Wasserflächen

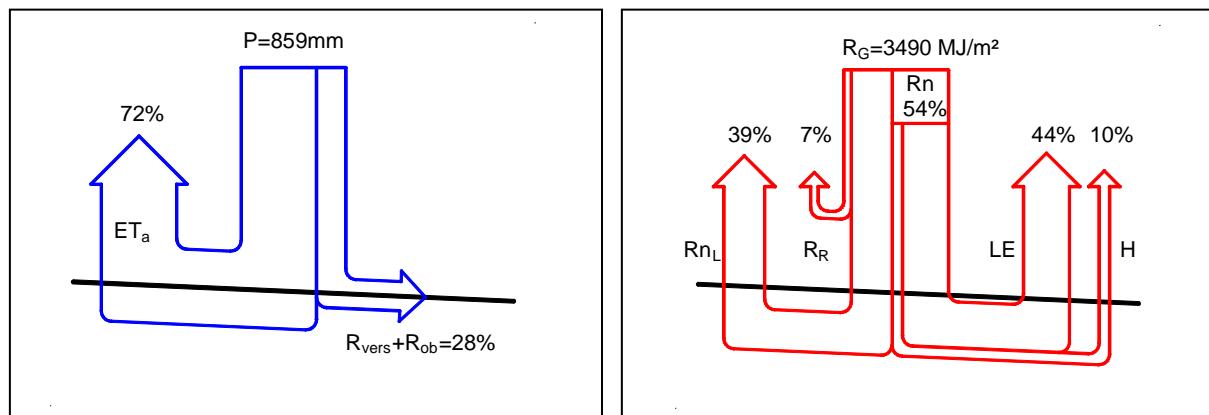


Bild 3-13

Jahreswasserbilanz  
(Legende und Erläuterungen - siehe Seite 60)

Jahresenergiebilanz

Der Anteil der Wasserflächen an der Gesamtfläche der BRD beträgt 2,3 % und umfasst eine Fläche von insgesamt 8 280 km<sup>2</sup> [Statistisches Bundesamt 2006]. Zwischen 1992 und 2004 nahm die Wasserfläche der Binnengewässer hauptsächlich aufgrund der Umwandlung von Tagebaurestlöchern in Seen um 440 km<sup>2</sup> zu.

Die Verdunstung über Wasserflächen wird als Evaporation bezeichnet. Diese ist nur abhängig von der zur Verfügung stehenden Energie und der Menge der mit der Luftbewegung abtransportierten Wassermoleküle. Im Vergleich zu bewachsenen oder versiegelten Flächen gibt es keine Begrenzung des zur Verfügung stehenden Wassers. Damit sind hohe Jahresverdunstungshöhen erreichbar.

Die hohe jährliche Verdunstungsmenge von Wasserflächen kann durch Wasserpflanzen sowie Bäume und Sträucher in Feuchtgebieten noch übertroffen werden. Diesen steht durch die Transpiration über die umfangreiche Blattmasse eine größere Verdunstungsfläche zur Verfügung. Gleichzeitig besteht ebenfalls keine Begrenzung der Wasserversorgung.

In den sächsischen Mittelgebirgen erreicht die mittlere Verdunstung freier Wasserflächen mit Tiefen von 4 bis 9 m etwa 650 mm/a (Zeitraum 1951 - 1975), bei einer mittleren potenziellen Evapotranspiration von etwa 540 mm/a [Richter 1984]. Die Verdunstung Berliner Gewässer erreicht 730 mm/a und überschreitet gemäß der Wasserbilanz im Umweltatlas Berlin [Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 2002] den Jahresniederschlag um etwa 160 mm.

Haupteinflussfaktoren auf die Evaporation von Wasserflächen sind:

- Temperatur der Wasseroberfläche
- Gewässergröße (insbesondere Wassertiefe und -menge)
- Gewässerform
- Windexposition

Die starke Abhängigkeit von der Temperatur der Wasseroberfläche beruht auf dem physikalischen Effekt, dass mit steigender Temperatur weniger Energie benötigt wird, um die Wassermoleküle aus der Flüssigkeit zu lösen.

Die über allen Oberflächen auftretende laminare Grenzschicht ist bei Wasser infolge der vergleichsweise ebenen Wasserfläche besonders ausgeprägt. In der laminaren Grenzschicht werden die Moleküle mit einem molekularen Diffusionskoeffizient von nur  $\sim 20 \text{ mm}^2/\text{s}$  transportiert. Über dieser Schicht oder wenn ausreichend starker Wind die Schicht auflöst, wirkt der turbulente Diffusionskoeffizient auf den Wasserdampf. Dieser erreicht eine Größenordnung von  $200\,000 \text{ mm}^2/\text{s}$  [Baumgarten und Liebscher 1996]. Daraus ist ersichtlich, wie stark der Einfluss bereits geringer Windgeschwindigkeiten auf die Verdunstungshöhe über Wasserflächen ist.

Je kleiner eine Fläche, desto flacher ist die laminare Grenzschicht über dieser Fläche. Da eine dünne laminare Grenzschicht leichter ausgetauscht werden kann, ist die verdunstungshemmende Wirkung geringer und die Verdunstung nimmt mit Abnahme der Fläche zu. Dieses, als Oaseneffekt bezeichnete Verhalten, wird neben der Gewässergröße auch durch die Form des Gewässers beeinflusst. Ein quer zur Hauptwindrichtung ausgerichtetes Gewässer verdunstet bei gleicher Fläche mehr als ein längs ausgerichtetes Gewässer. Entscheidend ist dabei die Überstreichlänge in der Hauptwindrichtung. Mit zunehmender Überstreichlänge des Windes reichert sich die Luft mit Wasser an und das Sättigungsdefizit wird geringer. Die Folge ist eine relative Abnahme der Verdunstungsleistung mit Zunahme der Gewässergröße (Bild 3-14).

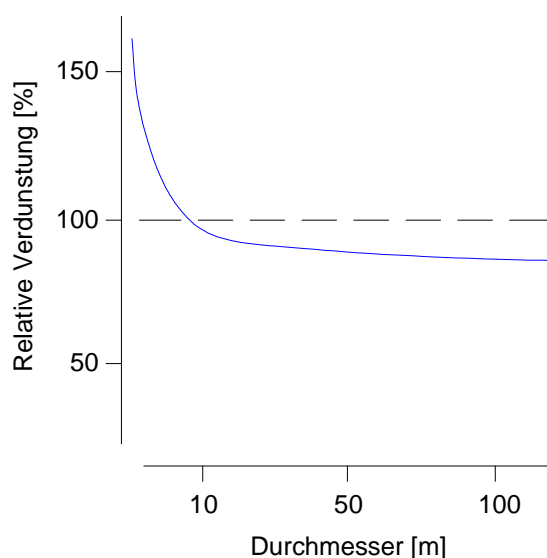


Bild 3-14

Abhängigkeit zwischen Gewässergröße und Verdunstungshöhe  
[Baumgarten und Liebscher 1996]

Der Jahresverlauf der Verdunstungshöhe von Gewässern folgt wie bei der Evapotranspiration der Pflanzen dem Jahresverlauf der Energieeinstrahlung. Die höchsten Werte werden im

Sommer mit mittleren Tagessummen von 7 mm erreicht [DWA 2002]. Nach Richter [1984] beträgt die Verdunstungshöhe in den Wintermonaten in Norddeutschland selbst bei eisfreien Gewässern nur 0,3 bis 0,4 mm/d. Dennoch erfolgt im langjährigen Mittel ein erheblicher Teil der Jahresverdunstung im Winter. Wohlrab et al. [1992:61] geben als grobe Schätzung für große und tiefe Seen einen Anteil von 20 bis 25 % für die Wintermonate an. Diese Verdunstung entsteht trotz des geringen Energieangebots, da der Dampfdruckgradient aufgrund des größeren Temperaturunterschieds zwischen der Luft und der Wasseroberfläche hoch bleibt. Voraussetzung ist eine ausreichend große Wassermasse zur Wärmespeicherung.

Die Verdunstung über Schnee- und Eisflächen ist sehr gering. Dazu tragen besonders die ohnehin geringe Verdunstung in der Wintermonaten infolge der geringen zur Verfügung stehenden Energie, die starke Reflexion und der fehlende Wassernachschub bei. Die Verdunstung über Eis und Schnee ist messtechnisch nur sehr schwer exakt zu erfassen, da durch unterschiedliche Strukturen und Verunreinigungen auf kleinem Raum große Abweichungen in den Eigenschaften der gefrorenen Oberflächen bestehen [Vietinghoff 2000]. So besitzt Eis eine hohe und Schnee dagegen eine niedrige Wärmeleitfähigkeit.

Die Albedo von Wasserflächen ist niedriger als bei den meisten bewachsenen Flächen. Damit steht mehr Energie für die Verdunstung zur Verfügung. Bedingt durch die höhere Reflexion bei niedrig stehender Sonne weisen Wasserflächen einen ausgeprägten Jahresgang der Albedo auf. Die mittlere monatliche Albedo von offenen Wasserflächen zeigt Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4 Jahresgang der Albedo  $\alpha$  offener Wasserflächen [DWA 1996]

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
<b>Albedo <math>\alpha</math></b>	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,09	0,11	0,12

Die Wasserflächen werden in dieser Arbeit unterteilt in:

- **Stehende Gewässer**
- **Wasserflächen mit Wasserpflanzen**
- **Fließgewässer**

Die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung erfolgt für die Wasserflächen mit dem Temperaturgleichgewichtsverfahren. Als Eingangsdaten sind langjährige Monatsmittelwerte der Klima- und Strahlungsdaten des Standortes erforderlich. Benötigt werden aus Messungen am Standort oder von der nächstgelegenen Klimastation mit vergleichbaren Bedingungen:

- Lufttemperatur in 2 m Höhe
- Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe und Hauptwindrichtung
- tatsächliche Sonnenscheindauer
- relative Luftfeuchtigkeit

Die Strahlungsdaten können aus der geografischen Breite errechnet oder aus Tabellen entnommen werden. Erforderlich sind:

- astronomisch mögliche Sonnenscheindauer
- extraterrestrische Strahlung

### **Besonderheiten von Wasserflächen mit Wasserpflanzen**

Wasserflächen mit Pflanzenbewuchs erreichen abhängig von der Pflanzenart in den meisten Fällen eine deutlich höhere Verdunstung als unbewachsene Wasserflächen, da zusätzlich zur Evaporation große Wassermengen durch Transpiration und Interzeption über die Blattoberflächen, die eine erhebliche Vergrößerung der verdunstungswirksamen Oberfläche bewirken, abgegeben werden. Bei Arten wie Teichrosen, die die Gewässeroberfläche abdecken, ist jedoch auch eine Reduzierung der Verdunstung möglich. Die in den Wintermonaten verringerte Verdunstung von bewachsenen Wasserflächen wird durch die wesentlich höhere Verdunstung in den Sommermonaten mehr als ausgeglichen.

Eine besonders hohe Verdunstung von über 1 000 mm/a erreichen nach Vietinghoff [2000], Grauvogel et al. [1995:72] und FBR [2001] Schilf und Binsen. Larcher [2001] gibt die Verdunstung von Röhricht mit 1 300 bis 1 600 mm/a und von Nasswiesen mit 1 100 mm/a an.

Die Verdunstung von Wasserflächen mit Wasserpflanzen ist schwer exakt zu ermitteln, da neben der erhöhten Verdunstung durch die Transpiration der Pflanzen zusätzliche Effekte, wie Verschattung und Reduzierung der Windgeschwindigkeit, gleichzeitig zu deren Verringerung führen.

Die Verdunstungsberechnung wird in dieser Arbeit unterteilt in die Teilflächen

- freie Wasserflächen
- Wasserflächen mit Wasserpflanzen

durchgeführt. Die Evaporation der unbewachsenen Wasserfläche wird nach dem Temperaturgleichgewichtsverfahren ermittelt. Für die Evapotranspiration der Wasserpflanzen wird ein Pauschalwert von 1 000 mm/a für Röhricht und 800 mm/a für Teichlilien angenommen. Mit diesem Betrag, der im unteren Bereich der in der Literatur genannten Zahlen liegt, werden sowohl die erhöhenden als auch die reduzierenden Auswirkungen der Wasserpflanzen auf die Verdunstung des Gewässers berücksichtigt.

### **Besonderheiten von Kleingewässern**

Die Anzahl der Seen einer bestimmten Größe steigt exponentiell mit der Abnahme der Fläche [UBA 2003]. So gibt es auf dem Territorium der BRD nur etwa 50 Seen mit einer Fläche >10 km<sup>2</sup> aber etwa 8 500 Seen mit einer Fläche <2 ha.

Kleine und flache Seen sowie Teiche weisen aufgrund der geringen Wassermasse Beson-



derheiten im hydrologischen Verhalten auf. Die Temperatur dieser Gewässer folgt der Lufttemperatur schneller und das Wasservolumen zirkuliert öfter. Dadurch kann sich keine Sprungschicht ausbilden und das vollständige Seevolumen ist am Wärmeumsatz beteiligt [Grauvogel et al. 1995]. Je flacher das Gewässer, umso stärker wirkt sich die Lufttemperatur auf die Wassertemperatur aus. Innerhalb des Gewässers kann sich eine sehr unterschiedliche Erwärmung des Wassers ergeben, da sich flache Bereiche (z.B. Uferzonen) und Bereiche über dunklem Untergrund besonders schnell und stark erwärmen. In windgeschützten Bereichen sind an heißen Sommertagen Temperaturen an der Wasseroberfläche bis 30 °C möglich [Grauvogel et al. 1995]. Eine Beschattung durch Pflanzen reduziert die Temperaturschwankungen spürbar.

In den Wintermonaten frieren kleine Gewässer eher und schneller zu. Die Winterverdunstung ist dadurch und auch infolge des geringeren Wärmespeichervolumens niedriger als bei größeren Gewässern.

Für die Berechnung der Verdunstung kleiner Gewässer gibt es bisher nur wenige Untersuchungen. Meist wird eine Verdunstung in Höhe der potenziellen Verdunstung angenommen. In dieser Arbeit wird die Evaporation von Wasserflächen mit dem Temperaturgleichgewichtsverfahren ermittelt. Der Oaseneffekt, durch die ständige Zufuhr trockener Luft aus der Umgebung, wird näherungsweise durch einen Zuschlagsfaktor  $f_{\text{ÜL}}$  berücksichtigt. Dazu wurde die in Bild 3-14 dargestellte Beziehung zwischen der Gewässergröße und der Verdunstungshöhe in die Berechnung eingearbeitet. Eingangsgröße ist die Ausdehnung des Gewässers in der Hauptwindrichtung und erfasst die Überstreichlänge der Luft. Der Zuschlagsfaktor beträgt  $f_{\text{ÜL}} = 1,0$  für eine Überstreichlänge von 100 m und  $f_{\text{ÜL}} = 1,3$  für eine Überstreichlänge von 5 m.

### **Fließgewässer**

Flüsse und Bäche weisen aufgrund der ständigen turbulenten Bewegung geringe Temperaturunterschiede im Gewässerprofil auf. Die Jahresmitteltemperatur nimmt zwischen Quelle und Mündung zu. Im Winter kann jedoch in Kälteperioden die Wassertemperatur der Quelle auch höher als im weiteren Verlauf des Fließgewässers sein.

In der Fachliteratur sind kaum Untersuchungen zum Verdunstungsverhalten von Flüssen und Bächen verfügbar. Im Allgemeinen wird eine Verdunstungshöhe, die gleich der potenziellen Verdunstung ist, angenommen. Der Einfluss des Windes und die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Oberflächen sind bei Fließgewässern durch die geringe Fläche im Vergleich zur Umgebung als besonders hoch anzunehmen. Allerdings existieren für die Berücksichtigung dieser Effekte bisher noch keine genauen Lösungen. Näherungsweise werden die Auswirkungen über den Zuschlagsfaktor  $f_{\text{ÜL}}$  in Abhängigkeit von der Gewässerbreite erfasst. Dieser steigt bei Überstreichlängen unter 10 m exponentiell an (Bild 3-14).

### 3.4 Wasser- und Energiebilanz bebauter Gebiete

In bebauten Gebieten wird die Landoberfläche in steigendem Maße durch künstliche Materialien versiegelt. Der Versiegelungsgrad liegt zwischen 30 bis 50 % in Wohnvierteln und 70 bis 95 % in Geschäftsvierteln. Das ursprüngliche Verhältnis zwischen den Anteilen der Hauptkomponenten des Wasserkreislaufs - Verdunstung, Versickerung und Abfluss - wird gravierend verändert. Der von natürlichen bewachsenen Flächen nur geringe Oberflächenabfluss steigt bei versiegelten Flächen zulasten besonders der Verdunstung aber auch der Versickerung erheblich an, da die hohen Verdunstungsraten der Evapotranspiration von Pflanzen in bebauten Gebieten nicht annähernd erreicht werden können.

In den folgenden Abschnitten wird das Verdunstungsverhalten der Oberflächen bebauter Gebiete für die verschiedenen Landnutzungsarten untersucht. Die Klassifikation aus den CORINE-Landnutzungsdaten ist nicht anwendbar, da diese eine Unterteilung nur hinsichtlich der Nutzung vornimmt (städtisch geprägte Gebiete, Industriegebiete, Flughäfen usw.). Die Art der einzelnen Oberflächenbefestigungen wird dabei nicht berücksichtigt. Für eine flächengenaue Untersuchung ist diese Aufteilung zu grob, so dass im Weiteren die in Tabelle 3-2 - Katalog der Landnutzungsarten - vorgenommene Unterteilung angewandt wird.

Die Landnutzungskategorie „Bebaute Fläche“ umfasst die Landnutzungsarten

- Versiegelte Flächen
  - Dachflächen
  - Straßen, Wege, Plätze (unterteilt in die Belagsklassen BK 1 - 4)
- Bewachsene Flächen in bebauten Gebieten
  - Parkanlagen
  - Sträucher und Büsche
  - Wiesen und Rasenflächen
  - Einzelbäume
  - Gründächer (unterteilt nach Aufbaustärke)
  - Fassadenbegrünung
  - Versickerungsmulden
- Künstliche Wasserflächen in bebauten Gebieten
  - Stehende Gewässer
  - Fließgewässer
  - Wasserflächen mit Wasserpflanzen

Der Anteil nicht versiegelter Flächen liegt mit Ausnahme der besonders intensiv genutzten Zentren von Großstädten in den meisten Siedlungsgebieten über 50 %. Die nicht versiegelten Flächen sind hauptsächlich bewachsene Flächen unterschiedlicher Art. Der Anteil von

Wasserflächen ist insgesamt gering, kann jedoch lokal bei Siedlungen an Flüssen oder Seen auch hohe Anteile erreichen.

Der seit mehr als 100 Jahren im großen Umfang anhaltende ständige Zuwachs an versiegelten Flächen hat inzwischen in Ballungsgebieten dazu geführt, dass spürbare Auswirkungen auf das Klima in den Städten und im angrenzenden Umland zu verzeichnen sind. Auswirkungen auf das Stadtklima gehen dabei nicht nur von der Versiegelung aus. Hinzu kommen eine insgesamt niedrigere Albedo, eine höhere Rauigkeit sowie die Auswirkungen der Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte.

Die Befestigung von Flächen ist für die urbanen Funktionen der Städte und Siedlungsgebiete unerlässlich. Insofern kann es nicht das Ziel sein, die Verdunstung in Städten vollständig an die bewachsener Flächen anzugleichen. Aufgrund der langfristig entstehenden negativen Auswirkungen muss es aber das Ziel sein, den Eingriff in den Naturhaushalt so gering wie möglich zu halten. Dazu ist eine sinnvolle Gestaltung der Oberflächen unter Berücksichtigung sowohl der geplanten Nutzung als auch der Auswirkungen auf den Wasser- und Energiehaushalt notwendig.

Die Maßnahmen im Rahmen der dezentralen und naturnahen Regenwasserbewirtschaftung sind bisher zu sehr auf die Versickerung konzentriert. Dieser Ansatz ist nicht ausreichend, da beispielsweise Mulden-Rigolen-Systeme meist auf vorhandenen Grünflächen angelegt werden, die bereits einen hohen Verdunstungsanteil haben. Bei der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung muss die Verdunstung stärker berücksichtigt werden.

Neben den Faktoren, die in Ballungsgebieten die Verdunstung erheblich reduzieren, führen einige anthropogene Einflüsse auch zu einer Erhöhung der Verdunstung. Dazu gehören die Freisetzung von Wasserdampf bei der Verbrennung fossiler Stoffe, die Zufuhr von Trink- und Brauchwasser, die Vergrößerung des turbulenten Wasserdampftransports in der Stadtgrenzschicht und ein erhöhter Niederschlag im Stadtgebiet [Helbig et al. 1999:31]. Diese anthropogenen Einflüsse sind jedoch insgesamt gering und können die verringerte Transpiration durch fehlende Pflanzen und das geringe Wasserangebot aufgrund der Versiegelung nicht annähernd ausgleichen. Lokal kann in Industriegebieten zum Beispiel durch Kühltürme von Kraftwerken eine spürbare Erhöhung der Verdunstung stattfinden. Diese Effekte sind in dieser Arbeit nicht mit erfasst und benötigen separate Untersuchungen.

Die Kopplung von Energie- und Wasserkreislauf führt dazu, dass in Städten mit der Verringerung der Verdunstung auch der Energieabtransport über den Verdunstungswärmestrom erheblich reduziert wird. Die Folge ist eine deutliche Erwärmung der Städte gegenüber dem Umland (Stichwort „Wärmeinsel“). Bedingt durch den Jahresgang der Sonnenstrahlung tritt die Erhöhung besonders im Sommer auf, wenn ohnehin bereits viel Energie zur Verfügung

steht und die Wärmebelastung für die Bewohner hoch ist. Die in Städten für Interzeptionsverdunstung und Transpiration benötigte Energie kann im Vergleich zu vollständig bewachsenen Flächen ein bis zwei Drittel niedriger sein [Fezer 1995].

Eine weitere Auswirkung der reduzierten Verdunstung ist eine geringere Luftfeuchtigkeit in den Städten. Diese liegt nach Fezer [1995] in Großstädten im Jahresmittel um ca. 6 %, im Sommer bis 8 %, unter den Werten für ländliche Gebiete. Insgesamt verstärkt sich die Tendenz zu einem trocken-heißen Stadtklima.

### 3.4.1 Versiegelte Flächen

Die versiegelten Flächen werden für diese Arbeit untergliedert in:

- **Dachflächen**
- **Straßen, Wege, Plätze**

Der Anteil versiegelter Flächen verhält sich proportional zur Siedlungsdichte. Dabei können innerhalb der Städte erhebliche Unterschiede zwischen den Grundstücken auftreten. Nach Untersuchungen des Umweltbundesamtes [UBA 2003] beträgt die Versiegelung in Großstädten bei Gebäuden- und Freiflächen etwa 70 % und bei Verkehrsflächen etwa 80 %. In Gemeinden in ländlichen Gebieten liegen diese Anteile bei 55 % und 48 %. Die Versiegelung der Gebäude- und Freiflächen umfasst dabei sowohl Dachflächen als auch Straßen, Wege und andere versiegelte Flächen dieser Grundstücke. Die Spannweite des Anteils nur der Dachflächen reicht von weniger als 15 % in locker bebauten Randgebieten bis zu 70 % in Zentren von Großstädten. In modernen Industrie- und Gewerbegebieten ist der Anteil von Dachflächen trotz der überwiegend einstöckigen Bebauung aufgrund der hohen Flächenanteile für Straßen und Abstellplätze für LKW und PKW vergleichsweise gering. Im Lauf der Jahre steigt sowohl in Wohngebieten als auch in Industrie- und Gewerbegebieten durch hinzukommende Ergänzungsbauten der Anteil versiegelter Flächen an.

Die Ermittlung des genauen Anteils ist nur durch Erfassung der Einzelflächen im jeweiligen Untersuchungsgebiet möglich.

Zwischen 1997 und 2000 betrug der Anteil der Siedlungsflächen am Zuwachs der Siedlungs- und Verkehrsfläche 82 % des mittleren Zuwachses von 129 ha/Tag [UBA 2003]. Trotz abnehmender Bevölkerungszahl wächst somit der Anteil der Siedlungsfläche.

Die Evaporation versiegelter Flächen entspricht physikalisch der Evaporation von unbewachsenem Boden. Sie erfolgt jedoch weitgehend unabhängig von geologischen Faktoren, da infolge der Versiegelung kaum noch Kontakt zum Boden besteht. Ein Wassernachschub aus dem Boden ist nicht oder kaum möglich, so dass die Evaporation versiegelter Flächen bei gleichen klimatischen Bedingungen geringer als bei vegetationslosen oder spärliche bewachsenen Flächen ist. Darüber hinaus liegt auch das Speichervermögen versiegelter Flä-

chen unter dem von natürlichen unbewachsenen Böden. Damit weisen versiegelte Flächen die geringsten Verdunstungshöhen aller Oberflächen auf.

Den begrenzenden Faktor bei versiegelten Flächen stellt das Wasserangebot dar. Für die Verdunstung steht nur Wasser aus der Benetzung der Oberfläche und dem Rückhalt in Unebenheiten zur Verfügung. Dessen Höhe ist abhängig von den Materialeigenschaften und der Neigung der Fläche.

Das Energieangebot aus der Atmosphäre kann auf den meisten versiegelten Flächen aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Wassermenge nicht ausgenutzt werden. Der dadurch verringerte Verdunstungswärmestrom führt zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur. Verbunden mit der höheren Wärmespeicherfähigkeit der Materialien steht nach einem Regenereignis eine hohe Energiemenge zur Verfügung, die das nicht abgelaufene Wasser in kurzer Zeit verdunsten lässt. Das Speichervermögen der Flächen ist eher geleert und kann öfter aufgefüllt werden. Trotz der geringen Speicherfähigkeit ergeben sich dadurch für vollständig versiegelte Oberflächen in der Jahresbilanz Verdunstungshöhen zwischen 15 und 20 % der Jahresniederschlagsmenge.

### Dachflächen

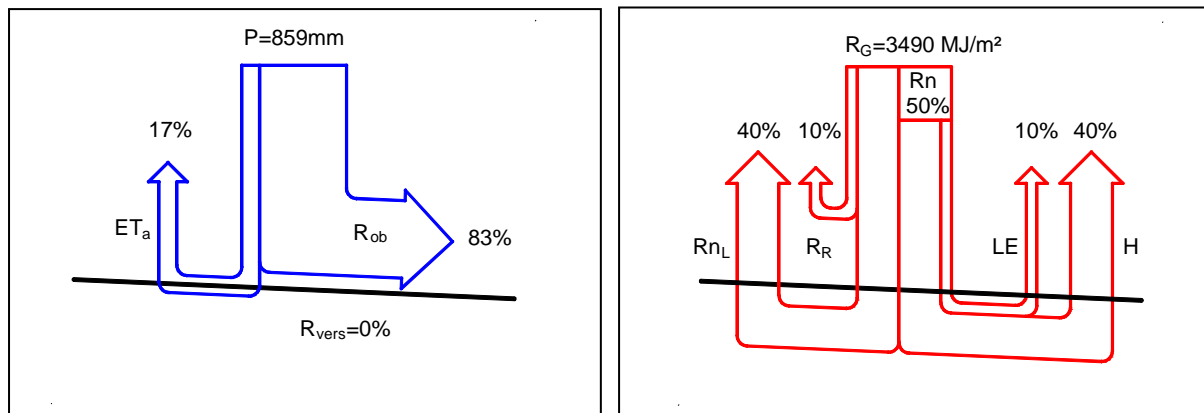


Bild 3-15

Jahreswasserbilanz  
(Legende und Erläuterungen - siehe Seite 60)

Jahresenergiebilanz

Das Verdunstungsverhalten von Dachflächen wird von der geringen Wasserspeicherfähigkeit der Dachbeläge bestimmt. Mit Ausnahme von Gründächern steht nur Wasser, das an den Oberflächen haftet oder in Unebenheiten und Mulden zurückgehalten wird, zur Verfügung. Dachbegrünungen werden im Kapitel 3.4.2 - Bewachsene Flächen in bebauten Gebieten - behandelt.

Die Höhe des an der Oberfläche und in Unebenheiten zurückgehaltenen Wassers ist von der Art des Dachbelags und von der Dachneigung abhängig. Das Rückhaltevermögen ist bei Dachziegeln höher als bei Metalldächern und sinkt mit der Zunahme der Dachneigung. Die

verdunstende Wassermenge liegt in der Größenordnung von 0,5 bis 1,5 mm des jeweiligen Niederschlags. Im Jahresverlauf summieren sich die einzelnen geringen Rückhaltungsmengen auf Anteile von 10 bis 20 % des Jahresniederschlags. Bei 4-jährigen Messungen an Flachdächern in Berlin [Knoll 2000] wurde bei Flächen mit Bitumenbelag ein mittlerer jährlicher Verdunstungsanteil von 10 % gemessen. Bei Flachdächern mit Metallbelägen (Titanzink und verzinnertes Kupferblech) betrug in Burgdorf in der Schweiz bei 2-jährigen Messungen der Abflussanteil 99 % und 100 %. Bei einem Ziegeldach der gleichen Versuchsanlage mit etwa 15° Dachneigung wurden Abflussanteile von 79 % und 81 % [Eawag 2005] ermittelt. Hier wird jedoch von den Autoren eine Überschätzung des Rückhaltevermögens aufgrund einer im Verhältnis zur Dachfläche sehr breiten und flachen Dachrinne angegeben.

Der Schwankungsbereich des Rückhaltevermögens versiegelter Dachflächen ist sowohl im Vergleich zwischen den einzelnen Jahren als auch zwischen Sommer- und Winterhalbjahr gering. In Berlin und in Burgdorf lagen die Abweichungen bei nur  $\pm 2$  %.

In der Energiebilanz konventioneller Dachflächen ist der latente Wärmestrom nur gering. Die absorbierte Energie wird hauptsächlich als fühlbare Wärme abgegeben. Die niedrige Albedo der oft dunklen Dachoberflächen bewirkt zudem eine starke Absorption der Sonnenstrahlung. Spürbar ist dieses Verhalten an den hohen Temperaturen von Bitumendächern im Vergleich zu anderen Oberflächen bei Sonneneinstrahlung an Strahlungstagen (Bild 3-16).

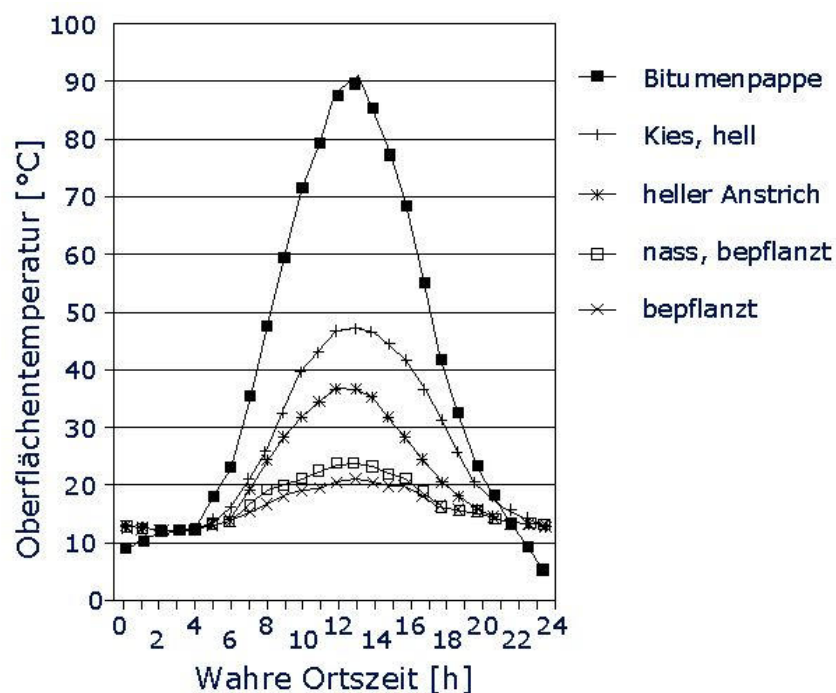


Bild 3-16

Tagesgang der Oberflächentemperatur für Flachdächer mit unterschiedlichen Belägen an einem Strahlungstag im Sommer  
[Innenministerium Baden Württemberg 2007, neu gezeichnet]

Der Wärmestrom von der Dachoberfläche ins Gebäude und vom Gebäude nach außen wird im langjährigen Mittel als null angenommen. Bei schlechter Dachisolation kann davon abweichend in der Jahresbilanz auch ein zusätzlicher Wärmestrom aus dem Gebäude in die Atmosphäre auftreten. Aufgrund des höheren Temperaturgradienten im Winterhalbjahr überwiegen die Wärmeverluste im Winter gegenüber den, zum Teil unerwünschten, Wärme gewinnen im Sommerhalbjahr.

Für Dachflächen sind neben den Klimadaten keine weiteren Ausgangswerte erforderlich. Der Effektivitätsparameter  $n_{\text{Bagrov}}$  wird für Steil- und Flachdächer angenommen mit:

Flachdächer  $\leq 15^\circ$      $n_{\text{Bagrov}} = 0,11$

Steildächer  $>15^\circ$      $n_{\text{Bagrov}} = 0,09$

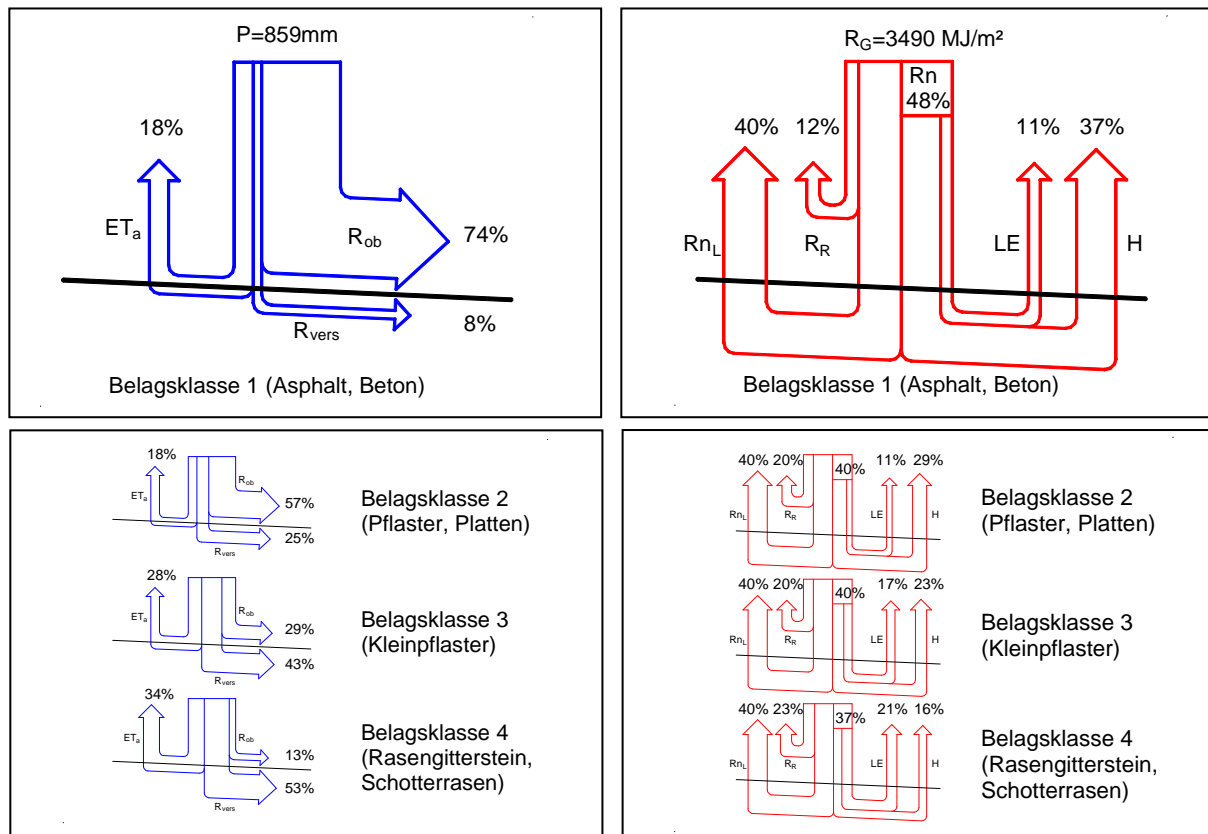
**Straßen, Wege und Plätze**

Bild 3-17

Jahreswasserbilanz  
(Legende und Erläuterungen - siehe Seite 60)

Jahresenergiebilanz

Die Oberflächen von Straßen, Wegen und Plätzen werden für die Berechnung der Wasser- und Energiebilanzen in dieser Arbeit in vier Belagsklassen eingeteilt:

- Belagsklasse 1:** Asphalt, Beton, Pflaster mit Fugenverguss oder Betonunterbau, Kunststoffbeläge
- Belagsklasse 2:** Kunststein- und Plattenbeläge (Kantenlänge >8 cm), Betonverbundpflaster, Klinker, Mittel- und Großpflaster, wassergebundene Decken
- Belagsklasse 3:** Klein- und Mosaikpflaster (Kantenlänge <8 cm)
- Belagsklasse 4:** Rasengitterstein, Schotterrasen

Die Einteilung erfolgt auf der Basis der von Glugla et al. [1999] für den Umweltatlas Berlin vorgeschlagenen Klassen. Die Belagsklassen wurden hinsichtlich der ökologischen Leistungsfähigkeit der Beläge aufgestellt. Untersucht wurden dabei unter anderem der Fugen- und Porenanteil, die Versickerungsfähigkeit und die thermischen Eigenschaften.

Die Arbeit mit Belagsklassen hat den Vorteil, dass nicht jede einzelne der vielen unterschiedlichen Straßen- und Wegebefestigungsarten im Berechnungsverfahren separat erfasst werden muss. Neue oder nur in geringem Umfang vorhandene Befestigungen können anhand



ihrer hydrologischen Eigenschaften in die entsprechende Belagsklasse eingeordnet werden.

Abweichend zur Einteilung im Umweltatlas Berlin werden die wassergebundenen Decken (Deckschichten ohne Bindemittel) nicht in die Belagsklasse 4 sondern in die Belagsklasse 2 eingeordnet. Nach neueren Untersuchungen wird die Durchlässigkeit dieser Flächen meist überschätzt. Bedingt durch die hohe Verdichtung beim Befahren und den Verschluss der Poren durch Feinbestandteile liegt die Durchlässigkeit unter der von Pflasterflächen [Borgwardt 1995, Münchow 1999]. Im „Merkblatt für durchlässige Befestigungen in Verkehrsflächen“ der FSGV [1998] wird auf den notwendigen Anteil von bindigen Stoffen für die Dauerhaftigkeit der Deckschichten ohne Bindemittel hingewiesen, der zu einer sehr geringen Wasserdurchlässigkeit führt.

Die Verdunstung der versiegelten Oberflächen von Straßen, Plätzen und Wegen wird mit dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren berechnet. Entscheidend für die Verdunstungshöhe versiegelter Flächen ist der Wasserrückhalt durch Benetzung und in Mulden. Als Ausgangswerte für die Verdunstungsberechnung sind neben den meteorologischen Größen Angaben zur Belagsklasse, zur Hangneigung und Hangausrichtung erforderlich. Der Bagrov-Effektivitätsparameter  $n$  wird für die Belagsklassen angenommen mit:

Belagsklasse 1 und 2	$n = 0,11$
Belagsklasse 3	$n = 0,25$
Belagsklasse 4	$n = 0,40$

Die Werte stammen aus Untersuchungen von Glugla und Krahe [1995]. Für die Belagsklassen 1 (Asphalt und Betonflächen) und 2 (Platten und Pflaster mit Kantenlängen >8 cm) wird ein gleich großer Bagrov-Parameter  $n$  angenommen. Zwar kann bei den Oberflächen der Belagsklasse 2 in den Fugen mehr Wasser zurückgehalten werden, infolge der höheren Versickerung steht jedoch kein zusätzliches Wasser für die Verdunstung zur Verfügung.

Für die Aufstellung der Wasserbilanz ist neben der Berechnung der Verdunstung eine Einschätzung der Anteile des Oberflächenabflusses und der Versickerung am Gesamtabfluss erforderlich. Auf der Basis der Auswertung von Lysimeteruntersuchungen und Infiltrationsmessungen an versiegelten Flächen in Berlin werden für die vier Belagsklassen die in Bild 3-18 angegebenen Anteile angenommen [Glugla und Krahe 1995, Wessolek und Facklam 1997]. Der Versickerungsanteil am Gesamtabfluss wurde für die Belagsklasse 4 von 90 % auf 80 % reduziert. Da dieser hohe Wert für den in Berlin sehr gut durchlässigen sandigen Untergrund gilt, werden mit der Reduzierung auch weniger durchlässige Böden berücksichtigt.

Belagsklasse	Oberflächenabfluss	Versickerung
1 (Asphalt, Beton)	90 %	10 %
2 (Platten, Pflaster mit Kantenlängen >8 cm)	70 %	30 %
3 (Pflaster mit Kantenlängen <8 cm)	40 %	60 %
4 (Rasengitterstein, Schotterrasen)	20 %	80 %

*Bild 3-18* Anteile der Komponenten Oberflächenabfluss und Versickerung am Gesamtabfluss für die Belagsklassen BK 1 - 4 [nach Glugla und Krahe 1995, Wessolek und Facklam 1997, verändert]

Die Energiebilanz der versiegelten Flächen von Straßen, Plätzen und Wegen ähnelt der Bilanz von Dachflächen. Einem hohen fühlbaren Wärmestrom steht ein sehr geringer Verdunstungswärmestrom gegenüber. Abweichungen ergeben sich aufgrund des höheren Zwischenspeichervermögens für Niederschlagswasser und einer im Vergleich zu den Dachflächen höheren Albedo. Eine Übersicht der in den Berechnungen für die Belagsklassen 1 - 4 angenommen Albedowerte enthält Bild 3-19.

Belagsklasse	Albedo
1 (Asphalt, Beton)	0,12
2 (Platten, Pflaster mit Kantenlängen >8 cm)	0,20
3 (Pflaster mit Kantenlängen <8 cm)	0,20
4 (Rasengitterstein, Schotterrasen)	0,23

*Bild 3-19* Albedo für Oberflächenbefestigungen von Straßen, Wegen und Plätzen, zusammengestellt nach Dyck und Peschke [1995], UBA [2001] und Sukopp [1993]

Die Albedo für Asphalt beträgt 0,05 bis 0,10 und für Beton etwa 0,20. Aufgrund des höheren Anteils von Asphaltstraßen wird für die Belagsklasse 1 eine Albedo von 0,12 angenommen. Die höhere Albedo der Belagsklasse 4 stammt aus dem Anteil der Grasflächen, die eine mittlere Albedo von 0,25 haben.

### 3.4.2 Bewachsene Flächen in bebauten Gebieten

Der Anteil bewachsener Flächen an der Siedlungs- und Verkehrsfläche beträgt ausgehend von den statistischen Angaben zum Versiegelungsgrad etwa 30 % in Großstädten und 50 % in ländlichen Gebieten. Er nimmt im Laufe der Zeit aufgrund von Ergänzungsbauten und der Versiegelung von Stellflächen und Wegen ab. Der Rückbau von Versiegelungen stellt die Ausnahme dar. Das Stadtumbauprogramm kann hier positive Impulse bringen.

Bewachsene Flächen in bebauten Gebieten sind gegenüber natürlichen Gebieten zusätzlichen Belastungen ausgesetzt. Die Hauptfaktoren sind:

- Begrenzung der Wasserverfügbarkeit
- Bodenverdichtung und Bodenversiegelung
- Luft- und Wasserschadstoffe
- Streusalz
- mechanische Beschädigungen.

Am stärksten sind bewachsene Flächen an Hauptverkehrsstraßen betroffen. Vergleichsweise günstig ist die Situation dagegen in großen Parkanlagen. Die Stressfaktoren können zu einem schwächeren Wuchs führen und machen die Pflanzen anfälliger für Krankheiten und Schädlinge. Infolgedessen ist mit einer geringeren Lebensdauer zu rechnen.

Die Einflussfaktoren auf die Pflanzen in urbanen Gebieten wurden in der von der Europäischen Union geförderten COST C15 Action „Technische Infrastruktur und Vegetation - Interdisziplinärer Ansatz zur Verbesserung der Wechselbeziehungen und Vermeidung von Konflikten“ in einem europäischen Erfahrungsaustausch aus einer Vielzahl von Sichtwinkel dargestellt und Lösungsansätze vorgeschlagen [Tekna 2006].

Die Auswirkungen dieser Faktoren auf die Lebenserwartung von Bäumen in bebauten Gebieten sind am Beispiel der Stadt Malmö untersucht in Thamm [1999].

Die bewachsenen Flächen in bebauten Gebieten werden für diese Arbeit untergliedert in:

- **Parkanlagen**
- **Sträucher und Büsche**
- **Wiesen und Rasenflächen**
- **Einzelbäume**
- **Gründächer, unterteilt in extensive und intensive Dachbegrünungen**
- **Fassadenbegrünung**
- **Versickerungsmulden**
- **Komplexe Parzellenstrukturen / Kleingärten**

Für diese Landnutzungsarten wurden die langjährigen mittleren Wasser- und Energiebilanzen berechnet.

## Parkanlagen

Der Wasser- und Energiehaushalt von Parkanlagen entspricht weitgehend dem von natürlichen Flächen. Insbesondere große Parkanlagen verhalten sich wie Mischwälder mit vergleichbarem Baumbestand.

Zusätzliche Belastungen für die Pflanzen entstehen durch die Bodenverdichtung bei intensiver Nutzung und durch Schadstoffimmissionen.

Für die Berechnung der Wasser- und Energiebilanz der Parkanlagen wird im BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren eine Aufteilung je zur Hälfte auf die Landnutzungsarten Laubwald und Grünland entsprechend Bild 3-20 vorgeschlagen.

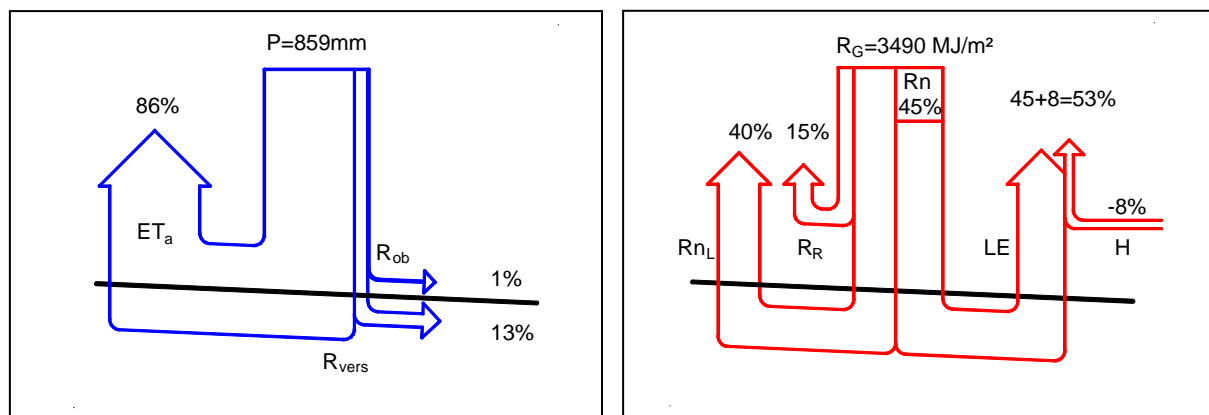
### Parkanlage

Grünland	Flächenanteil: 50%	mittlere Pflanzenhöhe: 12 cm
Laubwald	Flächenanteil: 50%	Umtriebsalter: 100 Jahre

*Bild 3-20*      Ansatz für die Berechnung der Landnutzungsart „Parkanlage“ im BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren [Glugla et al. 2003]

Für genauere und kleinräumige Untersuchungen und bei erheblichen Abweichungen von dieser Annahme, zum Beispiel bei hohen Anteilen von Wegen oder von Nadelbäumen, sollten die verschiedenen Nutzungsarten separat erfasst werden. Für die einzelnen Nutzungsarten können dann auf der Basis der Standortbedingungen die erforderlichen Komponenten berechnet werden. Anschließend sind die Gesamtwerte über das gewichtete Mittel des Anteils der Teilflächen an der Gesamtfläche zu ermitteln.

## Einzelbäume



*Bild 3-21*      Jahreswasserbilanz  
(Legende und Erläuterungen - siehe Seite 60)

Jahresenergiebilanz

Die der Einzelbäume in städtischen Gebieten ist erheblich. So sind beispielsweise im Stadtgebiet von Dresden etwa 45 000 Straßenbäume erfasst [Stadt Dresden 2005]. Im Durchschnitt steht damit an allen Straßen der Stadt im Abstand von 32 m einseitig ein Straßenbaum.

Die Verdunstung einzeln stehender Bäume ist bei gleichen Standortbedingungen größer als

bei Baumgruppen oder Wäldern. Hier wirkt sich der so genannte „Oaseneffekt“ besonders stark aus. Die Folgen des fehlenden geschlossenen Bestandes sind:

- eine verstärkte Energieeinstrahlung auf die Blätter durch die Reduzierung der gegenseitigen Beschattung und
- ein schnellerer Luftaustausch, der mit einer geringeren Luftfeuchtigkeit und damit der Aufrechterhaltung eines hohen Sättigungsdefizits verbunden ist.

Flemming [1987] stellte fest, dass nach der Entfernung jedes zweiten Baumes aus einem Wald, die Verdunstung nur um 30 bis 50 mm/a sinkt. Das entspricht einer Reduzierung der Verdunstung des Waldgebietes um weniger als 10 %. Gleichzeitig wird die Verdunstungsleistung pro Baum nahezu verdoppelt.

Für Einzelbäume in städtischen Gebieten erhöht sich die Verdunstung im Vergleich zu geschlossenen Beständen nach Untersuchungen von Kopinga [1998] um den Faktor 1,5 bis 2,0. Die Daten wurden aus mehrjährigen Messungen an Containerpflanzen ermittelt. Der Faktor 1,5 gilt für Einzelbäume in Grasflächen wie zum Beispiel in Parks und entlang von Straßen, der Faktor 2,0 für Bäume direkt innerhalb versiegelter Flächen wie beispielsweise in Gehwegen. Ursache ist das hohe Sättigungsdefizit der Luft infolge der in der Umgebung verringerten Verdunstung. Voraussetzung zum Erreichen der hohen Evapotranspiration sind günstige Standortbedingungen, besonders eine ausreichende Wasserversorgung. Ist diese nicht gewährleistet, muss mit einer Reduzierung auf 40 bis 60 % der erhöhten Werte gerechnet werden [Kopinga 1998].

Zur Berücksichtigung der urbanen Standortbedingungen der Einzelbäume werden in die Berechnung zwei Koeffizienten eingeführt:

- Urbane Standortbedingungen Lage  $f_{UL}$
- Urbane Standortbedingungen Wasserversorgung  $f_{UW}$

Der mit dem Algorithmus des BAGLUVA-Verfahrens für Laub- oder Nadelwälder anhand der klimatischen und geologischen Bedingungen ermittelte Rechenwert der Verdunstung wird mit diesen Koeffizienten multipliziert.

$$ET_a^{Einzelbaum} = ET_a^{Wald} \times f_{UL} \times f_{UW}$$

Ausgehend von den Untersuchungen von Kopinga [1998] werden die in Bild 3-22 angegebenen Werte für die Berücksichtigung der Lage und der Wasserversorgung unter urbanen Bedingungen vorgeschlagen.

<b>Urbane Standortbedingungen</b>		<b>Faktor</b>
<b>Lage</b>	- innerhalb versiegelter Fläche	$f_{UL} = 1,8$
	- innerhalb städtischer Grünfläche	$f_{UL} = 1,3$
<b>Wasserversorgung</b>		
- günstig:	unbefestigte Baumscheibe, Fläche >20 m <sup>2</sup> geringer Grundwasserflurabstand	$f_{UW} = 1,0$
- mittel:	unbefestigte Baumscheibe, Fläche 4 - 8 m <sup>2</sup>	$f_{UW} = 0,7$
- ungünstig:	Baumscheibe versiegelt oder verdichtet	$f_{UW} = 0,5$

*Bild 3-22* Koeffizienten zur Berücksichtigung der urbanen Standortbedingungen für Einzelbäume sowie Sträucher und Büsche

Zur Erfassung des Alters der Bäume wird analog zum Umtriebsalter  $UA$  bei Wäldern die mittlere Lebensdauer von Bäumen in Siedlungsgebieten angenommen.

Bezugsfläche für Einzelbäume ist die projizierte Fläche der Baumkrone. Die Größe und Dichte der Krone ist ein Indikator für die Standortbedingungen, da die Bäume ein an den Standort angepasstes Wurzel- und Kronensystem ausbilden (Tiefe, Umfang und Lage der Wurzeln; Umfang und Dichte der Krone). An ungünstigen Standorten wird eine deutlich kleinere und lichtere Krone als bei Bäumen der gleichen Art an günstigen Standorten ausgebildet. Damit verbunden ist eine geringere Evapotranspiration des Baumes. Mit der Verwendung der projizierten Fläche der Baumkrone als Bezugsfläche werden die Standortbedingungen bereits teilweise mit erfasst.

Die Energiebilanz der Bäume in bebauten Gebieten wird durch einen hohen Verdunstungswärmestrom und einen geringen Strom fühlbarer Wärme bestimmt. Die Albedo entspricht der von Wäldern und wird mit 0,17 für Laubbäume und 0,12 für Nadelbäume angenommen.

Die hohen Verdunstungsleistungen, die von Einzelbäumen an Standorten mit günstigen Bedingungen für die Wasserversorgung erreicht werden, übersteigen die nach den Strahlungsbedingungen verfügbare Energie. Sie sind nur erreichbar, wenn Energie aus angrenzenden Flächen mit verringerter Verdunstung herangeführt wird.

Für die Berechnung werden neben den Klima- und Strahlungsdaten als Ausgangswerte benötigt:

- Baumart (Laub- oder Nadelbaum)
- Bodenart und deren Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität
- Grundwasserflurabstand
- Koeffizient für urbane Standortbedingungen

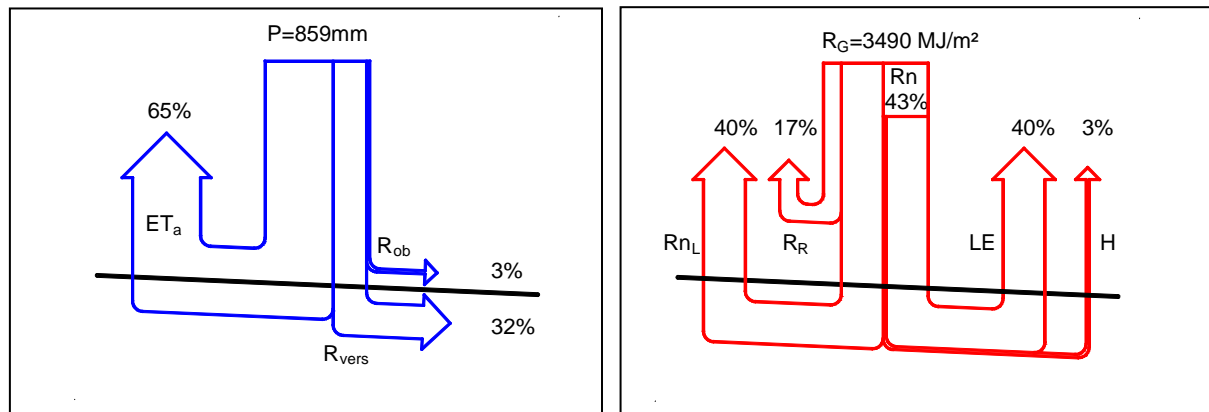
**Sträucher und Büsche**

Bild 3-23

Jahreswasserbilanz  
(Legende und Erläuterungen - siehe Seite 60)

Jahresenergiebilanz

Das Verdunstungsverhalten von Sträuchern und Büschen entspricht dem von Bäumen in jungen Jahren. Dieser Ansatz wird durch den Vergleich der Blattflächenindizes von Bäumen und Sträuchern bestätigt. Der Blattflächenindex beträgt in Abhängigkeit von Pflanzenart und Alter für Laubbäume 2 bis 8 m²/m² Kronenfläche und für Nadelbäume 5 bis 14 m²/m² Kronenfläche. Sträucher erreichen dagegen nur 2 bis 4 m²/m² Kronenfläche [Bronstert et al. 2001].

Die Verdunstung von Sträuchern und Büschen wird analog zu den Einzelbäumen auf der Basis der Algorithmen für Wälder berechnet. Der geringere Blattflächenindex der Sträucher wird durch die Annahme eines Umtriebsalters von 15 Jahren berücksichtigt. Gegenüber einem Umtriebsalter von 100 Jahren ergibt sich bei gleichen Standortbedingungen eine Verringerung der Evapotranspiration von etwa 25 %.

Die Berücksichtigung der besonderen Einflüsse der urbanen Standortbedingungen erfolgt analog zu den Einzelbäumen mit dem Koeffizienten  $f_{UL}$  hinsichtlich der Lage in versiegelten Flächen oder Grünflächen und mit dem Koeffizienten  $f_{UW}$  hinsichtlich einer günstigen, mittleren oder ungünstigen Wasserversorgung (Bild 3-22).

Einzeln oder in kleinen Gruppen gepflanzte Sträucher und Büsche sind wie Einzelbäume in besonderem Maße dem Oaseneffekt ausgesetzt. Dies kann für die Erhaltung einer hohen Verdunstungsrate in den Städten genutzt werden, wenn eine gute Wasserversorgung gewährleistet ist.

### **Wiesen und Rasenflächen**

Wiesen und Rasenflächen sind in bebauten Gebieten häufig anzutreffen. Rasenflächen werden vor allem auf Splitterflächen im Straßenrandbereich und um Wohngebäude eingesetzt. Die Größe reicht von Verkehrsinseln bis zu großflächigen Wiesen in den Auenbereichen von Flüssen. Genauere statistische Angaben zum Flächenanteil liegen nicht vor.

Zusammenhängende Wiesen- und Rasenflächen sind in bebauten Gebieten wichtige Kaltluftentstehungsgebiete. Sie kühlen deutlich stärker und schneller aus als beispielsweise Wälder. Gleichzeitig sind sie aufgrund der geringen Oberflächenrauigkeit für den Luftaustausch in Städten und damit für das Stadtklima wichtig [Sukopp 1993].

Im Vergleich zu versiegelten Flächen ist die Verdunstung von Wiesen und Rasenflächen bereits deutlich höher und erreicht vielerorts Werte von mehr als 60 % des mittleren Jahresniederschlags. Rasenflächen in Auen und Niederungen erzielen aufgrund der guten Wasserversorgung die höchsten Verdunstungsraten.

Die Verdunstung der Wiesen und Rasenflächen wird mit dem Algorithmus für Grünland aus dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren berechnet. Der Einfluss der Bodenart und der zusätzlichen Wasserversorgung bei grundwassernahen Standorten ist im Verfahren berücksichtigt. Da ständig geschnittene Rasenflächen weniger verdunsten als ungemähte Wiesen [DWA 2002] wird anstelle der für Grünland üblichen mittleren Pflanzenhöhe von 20 cm eine mittlere Pflanzenhöhe von 12 cm angenommen. Damit wird gleichzeitig die Verringerung der Verdunstung durch die zusätzlichen Belastungen für Rasenflächen in bebauten Gebieten infolge Verdichtung und Schadstoffimmissionen erfasst.



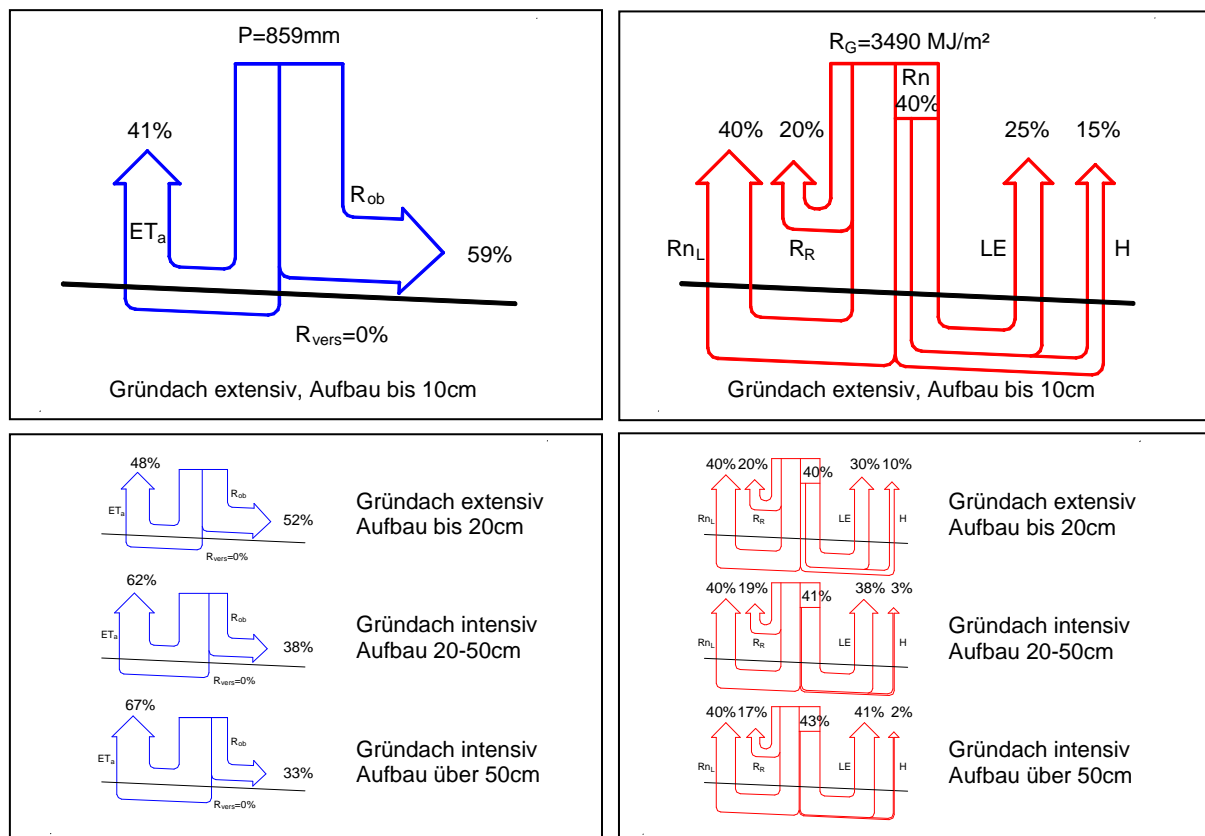
**Gründächer**

Bild 3-24

Jahreswasserbilanz

(Legende und Erläuterungen - siehe Seite 60)

Jahresenergiebilanz

Gründächer gehören zu den wirksamsten Elementen zur Verbesserung des Stadtklimas. Aus den sonst zu 100 % versiegelten Dächern werden Flächen mit einem hohen Verdunstungsanteil sowie einem stark verringerten und verzögerten Abfluss.

In den Jahren 2001 und 2002 wurden in der Bundesrepublik pro Jahr 13 bis 14 Millionen m<sup>2</sup> Gründächer angelegt. Das waren 14 % aller neu gebauten Flachdächer [Hämmerle 2002]. Gründächer werden unterteilt in extensive und intensive Dachbegrünungen. Als extensiv bezeichnet man Dachbegrünungen mit einer Aufbaustärke bis 20 cm und einer spärlichen Vegetation aus Moos, Sedum, Kraut und Graskulturen. Der Unterhaltungsaufwand ist sehr gering. Ab Aufbaustärken von mehr als 20 cm wird von intensiven Dachbegrünungen gesprochen. Hier werden neben Rasen auch Sträucher und Kleingehölze angepflanzt. Bei Gründächern mit Aufbaustärken über 50 cm ist die Anpflanzung von Bäumen möglich. Mit Zunahme der Aufbaustärke wächst der erforderliche Unterhaltungsaufwand.

2001 und 2002 wurden etwa 85 % der neuen Dachbegrünungen als Extensivbegrünung und 15 % als Intensivbegrünung hergestellt [Hämmerle 2002].

Das hydrologische Verhalten von Gründächern hängt hauptsächlich von der Stärke des Bodenaufbaus und der davon abhängigen Art und Höhe des Bewuchses ab. Die Aufbaustärke bestimmt das Wasserspeichervermögen und die mögliche Bepflanzung und diese wiederum

die für die Verdunstung entscheidende Transpirationshöhe.

Bei Gründächern wird der gesamte Niederschlag in Verdunstung und Abfluss aufgeteilt. Der Abfluss setzt sich zusammen aus dem Oberflächenabfluss, der entsteht sobald das Speichervermögen des Gründachaufbaus erreicht ist, und dem aus den Dränschichten abfließenden Wasser. Dabei handelt es sich um Wasser, dass im Gründach versickert ist und nicht wieder von den Pflanzen aufgenommen und verdunstet wurde. Der Abflussanteil lässt sich aufgrund der, im Gegensatz zu natürlichen Flächen, nach unten vorhandenen Abdichtung sehr genau durch Messung der Niederschlags- und Abflussmenge ermitteln.

<b>Dachbegrünungsart</b>	<b>Aufbaustärke</b>	<b>Mittlerer Anteil der Wasserrückhaltung am Jahresniederschlag</b>
Extensivbegrünung	2 - 4 cm	40 %
	>4 - 6 cm	45 %
	>6 - 10 cm	50 %
	>10 - 15 cm	55 %
	>15 - 20 cm	60 %
Intensivbegrünung	15 - 25 cm	60 %
	>25 - 50 cm	70 %
	>50 cm	> 90 %

*Bild 3-25* Mittlerer Anteil der Wasserrückhaltung von Dachbegrünungen in Abhängigkeit von der Stärke des Gründachaufbaus [FLL 2002]

In der Literatur sind die Auswertungen einer Vielzahl von Messprogrammen zu unterschiedlichen Dachbegrünungsarten verfügbar [u. a. Liesecke 1998, Knoll 2000, Uhl et al. 2003, Köhler 2004, Eawag 2005]. Bild 3-25 zeigt die von der Forschungsgesellschaft Landschaftsbau Landschaftsentwicklung (FLL) zusammengefassten mittleren Werte des Anteils der Rückhaltung bzw. der Verdunstung am Jahresniederschlag für verschiedene Aufbaustärken von Dachbegrünungen.

Das Wasserspeichervermögen des Gründachaufbaus ist der begrenzende Faktor für die Verdunstung. Es steigt mit der Zunahme der Aufbaustärke. Bereits geringe Aufbaustärken von 5 cm bei extensiv begrünten Dächern ermöglichen einen Rückhalt von knapp der Hälfte des Jahresniederschlags. Ursache ist der hohe Anteil von Moosen und deren hohes Speichervermögen. Bei Intensivbegrünungen werden in den aus mehreren Schichten bestehenden Dachaufbau spezielle Wasser speichernde Schichten eingebaut. Damit ist über den kapillaren Aufstieg eine längere Wasserversorgung der Pflanzen möglich. Dennoch sind für die Besiedelung von Gründächern Pflanzenarten erforderlich, die ein vollständiges Austrocknen des Bodens überstehen können.

Die Verdunstung von Gründächern weist einen stark ausgeprägten Jahresgang auf. Das Maximum liegt entsprechend der jahreszeitlich bedingten Wasser- und Energieverfügbarkeit im Sommer. Trotz höherer Niederschläge im Sommer ist der Abflussanteil niedriger als im Winterhalbjahr, da die hohe Evapotranspiration das Speichervolumen des Gründachaufbaus immer wieder entleert. Dagegen wird im Winterhalbjahr bei geringer Verdunstung das Was-

speichervermögen des Dachaufbaus nur selten ausgeschöpft. Die Folge ist, dass sich im Winterhalbjahr die Abflussverhältnisse von extensiven und intensiven Dachbegrünungen weitgehend annähern [Uhl et al. 2003]. Bei kühler Witterung kann selbst das geringe Speichervermögen von extensiven Gründächern nicht durch die Verdunstung ausgeschöpft werden.

Im BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren sind Gründächer bisher nicht erfasst. Für die Berechnung der Wasser- und Energiebilanz wurden deshalb neue Ansätze auf der Basis der im Verfahren vorhandenen Landnutzungsarten und Parameter aufgestellt. Die Dachbegrünungen werden für die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung hinsichtlich ihres hydrologischen Verhaltens in vier Arten aufgeteilt:

- Gründach, extensiv, Aufbaustärke bis 10 cm
- Gründach, extensiv, Aufbaustärke >10 bis 20 cm
- Gründach, intensiv, Aufbaustärke >20 bis 50 cm
- Gründach, intensiv, Aufbaustärke >50 cm

#### Gründach mit extensiver Begrünung, Aufbaustärke bis 10 cm

Das Verdunstungsverhalten der extensiven Dachbegrünungen entspricht dem von teilweise versiegelten Oberflächen. Das Wasserspeichervermögen ist auf eine Bodenschicht von maximal 10 cm Stärke, die Interzeption und das Wasseraufnahmevermögen des geringen Bewuchses beschränkt. Darüber hinaus auftreffender Niederschlag kommt zum Abfluss. Die Entleerung des Speichers erfolgt in den Sommermonaten überwiegend durch Verdunstung, da die flache Bodenschicht von den Pflanzen vollständig durchwurzelt werden kann und das gesamte Wasser zur Transpiration benötigt wird. Das vergleichsweise geringe Wasserspeichervermögen der extensiven Dachbegrünungen erfordert Pflanzenarten, die eine zeitweise vollständige Austrocknung überstehen können.

Die Speicherkapazität der Dachbegrünungen mit Aufbaustärken von 5 bis 10 cm liegt bei etwa 6 bis 12 l/m<sup>2</sup> [Liesecke 1998]. Das entspricht einer Niederschlagshöhe von 6 bis 12 mm. Niederschlagsmengen bis zu dieser Höhe können bei einem weitgehend entleerten Bodenspeicher ohne Oberflächenabfluss vom Gründach aufgenommen werden. Niederschläge mit Tagessummen bis 10 mm bringen etwa die Hälfte des mittleren Jahresniederschlags. Hieraus ergibt sich das relativ hohe Rückhaltevermögen extensiver Dachbegrünungen von 40 - 50 % des mittleren Jahresniederschlags. Ist der Bodenspeicher durch vorherige Niederschläge noch gefüllt, kann jedoch auch bereits bei deutlich geringeren Niederschlagsmengen ein Oberflächenabfluss auftreten.

Die Auswertung der Messungen an Versuchsflächen zeigt, dass die Verdunstung dieser Dächer zwischen der teilweise versiegelten Oberflächen der Belagsklasse 4 (Rasengittersteine,

Schotterrasen) und der von Wiesenflächen liegt. Anteile der Verdunstung am Jahresniederschlag von 40 bis 50 % wurden mit dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren bei der Verwendung des Algorithmus für versiegelte Flächen und einem Bagrov-Effektivitätsparameter von  $n_{Bagrov} = 0,7$  errechnet. Dieser Ansatz wird für die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung extensiver Dachbegrünungen bis 10 cm Aufbaustärke angewandt.

#### Gründach mit extensiver Begrünung, Aufbaustärke >10 bis 20 cm

Mit der Zunahme der Aufbaustärke auf bis zu 20 cm erhöht sich das Wasserspeichervermögen der Dachbegrünung deutlich. Das zusätzliche verfügbare Wasser und ein erhöhtes Nährstoffangebot ermöglichen ein umfangreicheres Pflanzenwachstum. Ausgehend von dem durch Messungen ermittelten mittleren Verdunstungsanteil von 50 bis 60 % des Jahresniederschlags wird für diese Dachbegrünungen die Berechnung der Verdunstung ebenfalls mit dem Algorithmus für versiegelte Flächen, jedoch mit einem höheren Bagrov-Effektivitätsparameter von  $n_{Bagrov} = 1,25$  durchgeführt.

#### Gründach mit intensiver Begrünung, Aufbaustärke >20 bis 50 cm

Die hydrologischen Eigenschaften der Dachbegrünungen nähern sich mit der Zunahme der Aufbaustärke immer mehr den Eigenschaften natürlicher bewachsener Flächen an, wobei die verfügbare Wassermenge und damit verbunden die Vegetationsdichte steigt.

Bei Aufbaustärken über 20 cm ist auch der bei geringen Mächtigkeiten noch vernachlässigbare Einfluss der Bodenart zu berücksichtigen. Dieser beeinflusst die Verdunstung über die Speicherfähigkeit des Bodens und die Höhe des kapillaren Wasseraufstiegs.

Davon ausgehend wird die Berechnung mit dem Algorithmus für Grünland durchgeführt. Als zusätzliche Eingangsdaten sind dann die mittlere Pflanzenhöhe und die Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität erforderlich. Die mittlere Pflanzenhöhe wird mit 12 cm angenommen. Bei Grünland auf natürlichen Böden kann aus der Angabe des Grundwasserflurabstandes der kapillare Wasseraufstieg bis zur effektiven Wurzeltiefe ermittelt werden. Damit wird für die Pflanzen in Trockenperioden zusätzlich verfügbares Wasser erfasst. Die bei Gründächern eingebauten speziellen Wasserspeicherschichten ermöglichen ebenfalls zeitweise einen Wassernachschub durch kapillaren Aufstieg. Im Gegensatz zum Wassernachschub aus Grundwasserleitern ist dieser jedoch durch das Speichervermögen der Schichten begrenzt. Er ist deshalb mit dem Wassernachschub aus Grundwasserleitern nicht zu vergleichen und wird nicht berücksichtigt.

Die Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität charakterisiert das Wasserspeichervermögen des Bodens und hängt von der Bodenart ab. Dachbegrünungen werden überwiegend mit industriell hergestellten Bodenmischungen angelegt. Zur Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit enthalten diese Böden oft hohe Anteile an vulkanischen Gesteinen, Blähton, Ziegelgrus

oder ähnlichen saugfähigen Materialien. Damit sollen die Beschränkungen der Wasserverfügbarkeit infolge des geringen Bodenvolumens teilweise ausgeglichen werden.

Das Wasserspeichervermögen dieser Substrate entspricht dem von Lössboden [Möcsényi et al. 1997]. Von den natürlichen Böden weisen Lössböden das höchste Wasserspeichervermögen auf, wobei die nutzbare Feldkapazität 20 bis 25 % beträgt. Im Weiteren wird deshalb für die Bodenmischungen der Gründächer eine Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität von 20 % für Aufbaustärken von 20 bis 50 cm und von 22 % für Aufbaustärken >50 cm angenommen.

Die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung intensiver Dachbegrünungen mit einer Aufbaustärke bis 50 cm erfolgt mit den Parametern:

Landnutzungsart:	Grünland
mittlere Pflanzenhöhe:	$z_B = 12 \text{ cm}$
Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität:	$\Theta_{nFK} = 20 \%$

#### Gründach mit intensiver Begrünung, Aufbaustärke >50 cm

Aufwändige Dachbegrünungen mit Aufbaustärken über 50 cm haben ein Verdunstungsverhalten, das dem von natürlichen bewachsenen Flächen auf grundwasserfernen Standorten entspricht. Die Vegetation umfasst Rasenflächen, Sträucher und kleine Bäume. Teilweise sind befestigte oder unbefestigte Wege vorhanden. Die Fläche dieser Dächer ist aufgrund des hohen Kostenaufwandes meist geringer als bei extensiven Dachbegrünungen, so dass eine Erfassung der tatsächlichen Flächenanteile der Landnutzungsarten (Rasen, Sträucher, Einzelbäume, versiegelte oder vegetationslose Fläche bei Wegen) und deren separate Berechnung nicht erforderlich sind. Mit ausreichender Näherung kann eine prozentuale Aufteilung in die Landnutzungsarten Grünland (70 %) und Sträucher (30 %) vorgenommen werden. Vereinzelt vorhandene Bäume werden vernachlässigt.

Die tatsächliche Verdunstung der Sträucher wird mit dem Algorithmus für Wälder und einem Umtriebsalter von 15 Jahren berechnet. Zusätzlich werden die Koeffizienten  $f_{UL}$  und  $f_{UW}$  für die urbanen Standortbedingungen hinsichtlich Lage und Wasserversorgung einbezogen.

Damit wird die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung intensiver Dachbegrünungen mit einer Aufbaustärke über 50 cm auf der Basis folgender Ansätze ermittelt:

Landnutzungsart:	70 % Grünland	30 % Sträucher
Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität:	$\Theta_{nFK} = 22 \%$	$\Theta_{nFK} = 22 \%$
mittlere Pflanzenhöhe:	$z_B = 12 \text{ cm}$	- - -
Umtriebsalter:	- - -	$UA = 15 \text{ a}$
Urbane Standortbedingungen:		
Lage innerhalb versiegelter Fläche	- - -	$f_{UL} = 1,8$
mittlere Wasserversorgungsbedingungen	- - -	$f_{UW} = 0,7$

Die für extensive und intensive Dachbegrünungen in Abhängigkeit von der Aufbaustärke für die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung angewandten Ansätze und Berechnungsverfahren sind in Bild 3-26 zusammengefasst.

Dachbegrünungsart	Berechnungsansatz
Extensivbegrünung	
- Aufbaustärke bis 10 cm	versiegelte Fläche, $n_{Bagrov} = 0,7$
- Aufbaustärke >10 bis 20 cm	versiegelte Fläche, $n_{Bagrov} = 1,25$
Intensivbegrünung	
- Aufbaustärke >20 bis 50 cm	Grünland, mittlere Pflanzenhöhe 12 cm, $\Theta_{nFK} = 20 \%$
- Aufbaustärke >50 cm	70 % Grünland, mittlere Pflanzenhöhe 12 cm, $\Theta_{nFK} = 22 \%$ 30 % Sträucher, Umtriebsalter 15 Jahre, $\Theta_{nFK} = 22 \%$ Urbane Standortfaktoren $f_{UL} = 1,8$ $f_{UW} = 0,7$

**Bild 3-26** Zusammenfassung der Ansätze zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung von Dachbegrünungen

Eine Differenzierung der Dachbegrünungen für unterschiedliche Dachneigungen erfolgt nicht. Nach Untersuchungen von Uhl et al. [2003] und Kolb [1999] wurde der Einfluss der Dachneigung bisher überschätzt. Für Neigungen zwischen  $1,4^\circ$  und  $40^\circ$  ändert sich der Abflussanteil bei gleichem Dachaufbau nur unwesentlich.

### Energiebilanz von Gründächern

Dachbegrünungen verändern die Energiebilanz einer Dachfläche gravierend. Während konventionelle Bitumen- oder Ziegeldächer den überwiegenden Teil der absorbierten Strahlungsenergie in fühlbare Wärme umwandeln, wird von Gründächern der überwiegende Teil der Strahlungsenergie über den Verdunstungswärmestrom als latente Energie abgegeben.

Entscheidend sind dabei zwei Faktoren: zum einen das höhere Wasserspeichervermögen und zum anderen die höhere Albedo der Dachbegrünungen.

Den größten Einfluss auf den Verdunstungswärmestrom hat das Wasserspeichervermögen des Dachaufbaus. Für konventionelle Dachbefestigungen ist ein Rückhalt nur durch die Benetzung der Oberfläche und in Unebenheiten möglich und liegt damit in der Größenordnung von 0,5 bis 1,5 l/m<sup>2</sup>. Das Wasserspeichervermögen von Gründächern erreicht dagegen bereits bei extensiven Dachbegrünungen mit einer Aufbaustärke von nur 5 cm Werte von 6 bis 10 l/m<sup>2</sup>. Mit der Zunahme der Aufbaustärke bis hin zu intensiv begrünten Dächern nähert sich das Wasserspeichervermögen dem von natürlichen Böden immer weiter an. Dachbegrünungen mit Aufbaustärken über 50 cm können bis zu 200 l/m<sup>2</sup> speichern [Reeh et al. 2006].

Das im Boden gespeicherte Wasser wird überwiegend durch Verdunstung aufgebracht und führt zum hohen Verdunstungswärmestrom der Dachbegrünungen.

Die mittlere Albedo ist bei Bitumen- und Schieferdächern mit 0,10 am niedrigsten. Höhere Werte erreichen Ziegeldächer. Diese liegen je nach Materialeigenschaften bei 0,15 bis 0,25. Eine Ausnahme bei den konventionellen Dächern sind mit Kies bedeckte Flachdächer, die eine Albedo von etwa 0,30 besitzen und damit die höchste Reflexion der Dachflächen aufweisen [Sukopp 1993]. Sie übertrifft sogar die Albedo von Dachbegrünungen, die je nach Art der Bepflanzung bei 0,20 bis 0,25 liegt.

### **Fassadenbegrünung**

Der Flächenanteil der Fassadenbegrünungen ist sehr gering. Sie beeinflussen hauptsächlich das Mikroklima unmittelbar am Gebäude und haben zudem eine hohe psychologische Wirkung. Die stadtklimatische Wirkung ist aufgrund der kleinen Fläche nur gering [Helbig et al. 1999]. Verbesserungen des Mikroklimas ergeben sich durch die Erhöhung der Verdunstung und damit verbunden der Luftfeuchtigkeit sowie durch die Verringerung der Temperaturamplitude der Hauswand.

Das Wachstum von Pflanzen an Fassaden erfolgt annähernd zweidimensional in Höhe und Breite. Die Tiefe ist meist nur gering und dadurch haben sie im Vergleich zu freistehenden Bäumen erheblich weniger Biomasse und Blattoberfläche. Die Auswirkungen einer Fassadenbegrünung auf den Wasser- und Energiehaushalt sind vergleichbar mit denen eines Einzelbaumes der gleichen Biomasse. Unterschiede ergeben sich besonders durch die geschützte Lage an der Hauswand, die geringere gegenseitige Abschirmung der Blätter und die begrenzte Wasserversorgung.

Ein zusätzlicher kapillarer Aufstieg wird nicht berücksichtigt, da die Pflanzgruben der Fassadenbegrünung unmittelbar an der Hauswand liegen. Zum Schutz des Gebäudes wird in den meisten Fällen der Grundwasserspiegel am Gebäude so niedrig sein, dass kein kapillarer Aufstieg zum Wurzelbereich der Pflanzen erfolgen kann.

Zur Erfassung der Größe der Fassadenbegrünung wird zum einen die Grundfläche genutzt, zum anderen wird die Höhe über den Parameter Umtriebsalter erfasst.

Das Umtriebsalter stellt bei Wäldern die planmäßige Wachstumsdauer bis zum Einschlag dar. In der Berechnung der Verdunstung wird das Umtriebsalter als Maß für die mittlere Pflanzenhöhe angewandt. Ausgehend von der Pflanzenhöhe bei einem bestimmten Alter werden für die verschiedenen Fassadenhöhen als Umtriebsalter angenommen:

<b>Fassadenhöhe</b>		<b>Umtriebsalter</b>
1 - 2 Etagen	bis 8 m	15 Jahre
3 - 4 Etagen	bis 12 m	20 Jahre
4 - 6 Etagen	bis 20 m	25 Jahre

Um Fassadenbegrünungen berücksichtigen zu können, erfolgt die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung mit dem Berechnungsansatz für Einzelbäume auf der Basis der Grundfläche der Fassadenbegrünung. Erforderliche Daten sind neben den Klimadaten:

- Pflanzenart
- Fassadenhöhe (Umtriebsalter)
- Bodenart und deren Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität

Der Einfluss auf den Energiehaushalt ist aufgrund des geringen Flächenanteils ebenfalls gering. Erfasst werden der latente Energiestrom und die Reflexion der ankommenden Strahlung. Für die Ermittlung der latenten Energie wird die jährliche Verdunstungshöhe der Fassadenbegrünung genutzt. Die Reflexion wird mit der Albedo der Laubbäume von 0,17 angenommen.

### **Versickerungsmulden**

Der Anteil von Versickerungsmulden wächst mit der Verbreitung der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung in urbanen Gebieten. Dazu gehören auch die Versickerungsmulden von Mulden-Rigolen-Systemen. Die Verdunstungsleistung von Mulden-Rigolen-Systemen ist vernachlässigbar niedriger als bei Versickerungsmulden ohne Rigolen [Kaiser 2004]. Die geringe Differenz resultiert aus der höheren Durchlässigkeit der Versickerungsschichten bei Mulden-Rigolen-Systemen, die für die ausreichend schnelle Aktivierung des Speichervermögens der Rigole erforderlich ist. Im Rahmen der Genauigkeit des Verfahrens erfolgt deshalb keine Unterscheidung zwischen Versickerungsmulden mit und ohne Rigolen.

Die Versickerungsmulden bringen zusätzlich zum eigentlichen Zweck der Zwischenspeicherung des Niederschlagswassers für die Versickerung auch eine Erhöhung der Verdunstung. Durch Langzeitsimulationen mit Echtzeitregendaten ermittelte Kaiser [2004] für verschiedene Standorte in Nordrhein-Westfalen mit einem Jahresniederschlag von 800 mm einen mittleren Verdunstungsanteil der Versickerungsmulden von 85 % des Jahresniederschlags. Als günstig erweist sich hier, dass das zusätzliche Wasserangebot durch den gleich gehenden Jahresverlauf von Niederschlag und Sonnenstrahlung in Zeiten mit hoher Verdunstungsleistung auftritt.

Insgesamt liegen zum Verdunstungsverhalten von Versickerungsmulden und Mulden-Rigolen-Systemen bisher kaum langjährige Untersuchungen vor. In Anbetracht des in Zukunft zunehmenden Einsatzes dieser Entwässerungsart besteht hier ein großer Forschungsbedarf.

Versickerungsmulden sind fast immer reine Grasflächen. Nur in Einzelfällen sind sie mit Sträuchern und Bäumen bewachsen. Die Berechnung erfolgt deshalb mit dem Algorithmus des BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahrens für Grünland. Die mittlere Pflanzenhöhe wird mit



12 cm angenommen. Der zusätzliche Regenwasserzufluss aus den angeschlossenen befestigten Flächen wird als Beregnungsmenge erfasst. Er wird als Produkt aus der angeschlossenen Fläche, dem Jahresabflussbeiwert und dem mittleren jährlichen Niederschlag bestimmt.

In Abhängigkeit von der Größe der angeschlossenen versiegelten Fläche kann dabei die maximale mittlere Verdunstung bei ausreichender Wasserversorgung  $ET_{max}$  erreicht werden. Diese stellt die energetisch bedingte Obergrenze für die Verdunstung am Standort dar. Die Überschreitung der maximalen Verdunstung  $ET_{max}$  ist möglich, erfordert jedoch, dass ein zusätzlicher Energietransport aus angrenzenden Flächen stattfinden muss. Da die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen angrenzenden Flächen mit unterschiedlichen Verdunstungseigenschaften noch nicht gelöst ist, wird die tatsächliche Verdunstung der Versickerungsmulden bei Berücksichtigung des zusätzlichen Zulaufs aus angeschlossenen versiegelten Flächen auf die maximal mögliche Verdunstung  $ET_{max}$  beschränkt. Diese vollständige Ausnutzung bedeutet jedoch, dass jederzeit ausreichend Wasser für die Verdunstung zur Verfügung stehen muss. Da das im Jahresverlauf zum Beispiel durch Trockenperioden nicht immer der Fall ist, erfordert bereits die Begrenzung auf die maximal mögliche Verdunstung  $ET_{max}$  eine teilweise Zufuhr von Wärmeenergie aus angrenzenden Flächen.

Der über den Notüberlauf von Versickerungsmulden abfließende Oberflächenabfluss ist bei fachgerechter Bemessung gering und kann in der langjährigen Bilanz vernachlässigt werden.

Als Ausgangswerte werden für die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung von Versickerungsmulden neben den Klima- und Strahlungsdaten benötigt:

- Bodenart und deren Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität
- angeschlossene versiegelte Fläche
- Jahresabflussbeiwert der versiegelten Fläche

Der Einfluss auf den Energiehaushalt wird über den latenten Energiestrom und die Reflexion. Letztere wird analog zu Grünland mit einer Albedo von 0,20 angenommen. Die zeitweise vorhandene Wasserfläche beim Aufstau in der Mulde wird nicht berücksichtigt, da das aufgestaute Wasser zur Vermeidung der Verschlammung der Mulde innerhalb weniger Stunden versickert.

### **Komplexe Parzellenstrukturen / Kleingärten**

Für die Berechnung der Verdunstung von Kleingärten wird die Empfehlung aus dem BAGLUVA-Verfahren übernommen und eine näherungsweise Aufteilung in die auf diesen Flächen vorkommenden Landnutzungsarten durchgeführt:

- 35 % Grünland, mittlere Pflanzenhöhe 20 cm
- 40 % Ackerland
- 25 % Laubwald, Umtriebsalter 10 Jahre

Als Ausgangswerte sind neben den Klima- und Strahlungsdaten Angaben zur Bodenart und zum Grundwasserflurabstand erforderlich.

### **3.4.3 Wasserflächen in bebauten Gebieten**

Das Bild vieler Städte wird durch markante Wasserflächen bestimmt. Wasser ist ein lebenswichtiges Element und so siedelten sich in der Vergangenheit die Menschen an Bächen, Flüssen oder Seen an. Fast alle großen Städte liegen an Gewässern. Mit der Zunahme der Bebauungsdichte wurden die Gewässer mehr und mehr zurückgedrängt. Kleinere Fließgewässer wurden überbaut oder kanalisiert und die Hochwasserüberschwemmungsgebiete der Flüsse besiedelt. Dennoch ist weiterhin eine Vielzahl von Wasserflächen in Städten vorhanden. Die Größe reicht von Springbrunnenbecken und in Beton eingefassten Bachläufen bis hin zu großen Seen und Flüssen.

Alle Wasserflächen erreichen hohe Verdunstungsraten. Sie können, einen ausreichenden Zufluss vorausgesetzt, immer das vorhandene Energieangebot zur Verdunstung ausnutzen. Die bei Pflanzen oder versiegelten Flächen zeitweise wirksame Beschränkung der Verdunstung durch nicht ausreichendes Wasser besteht nicht.

Teiche und Seen mit Abmessungen von 20 bis 50 m Länge und Breite sind besonders oft in bebauten Gebieten anzutreffen. Für diese kleinen Wasserflächen wurde ein ausgeprägter Oaseneffekt nachgewiesen [Baumgarten und Liebscher 1996]. Die ständige Zufuhr von trockener Luft hält ein hohes Sättigungsdefizit der Luft aufrecht und erhöht die spezifische Verdunstung im Vergleich zu großen Wasserflächen.

Mölders [1999] beschreibt ausführlich das Verhalten von Wasserflächen in städtischen Gebieten. Demzufolge ist die Oberflächentemperatur der Wasserflächen im Sommerhalbjahr nachts höher und tags niedriger als die Temperatur der umgebenden bewachsenen Flächen. Im Ergebnis ist die Verdunstung über den Wasserflächen tagsüber kleiner als bei Pflanzen. Mit der allmählichen Zunahme der Lufttemperatur über den Wasserflächen im Tagesverlauf wird die Verdunstung über dem Wasser nachmittags stärker als die Verdunstung von Pflanzen. Im Gegensatz zu den Pflanzen, bei denen die Transpiration abends zum Stillstand

kommt, hält die Evaporation über dem Wasser bis lange in die Nacht an. Damit ergibt sich in der Tagessumme eine höhere Verdunstung von Wasserflächen. Sie verdunsten außerdem in Städten im Winter mehr als im Umland, weil die Eisbedeckung durch höhere Temperaturen in der Stadt später einsetzt und kürzer anhält.

Die Wasserflächen in bebauten Gebieten werden in dieser Arbeit unterteilt in:

- **Stehende Gewässer**
- **Fließgewässer**
- **Wasserflächen mit Wasserpflanzen**

Diese Aufteilung stimmt mit der von Wasserflächen in natürlichen Gebieten überein. Die Berechnungsverfahren und Besonderheiten der Gewässerarten sind ausführlich im Kapitel 3.3.3 - Verdunstung von Wasserflächen in unbebauten Gebieten - beschrieben.

Besondere Berechnungsansätze für die Gewässer in bebauten Gebieten werden nicht angewandt. Die in bebauten Gebieten besonders stark zu verzeichnende erhöhte Evaporation kleiner Gewässer wird mit dem Zuschlagsfaktor  $f_{UL}$  in Abhängigkeit von der Überstreichlänge in Hauptwindrichtung entsprechend den Erläuterungen im Kapitel 3.3.3 erfasst. Mögliche zusätzliche Effekte, die sich aus der in Städten im Durchschnitt trockeneren Luft und der höheren Lufttemperatur ergeben, sind derzeit noch nicht hinreichend genau erfassbar und müssen deshalb vernachlässigt werden.

### 3.5 Maßnahmen zur Erhöhung der Verdunstung in bebauten Gebieten

Die hohen Verdunstungsraten bewachsener Flächen können in bebauten Gebieten nicht mehr erreicht werden. Dafür verdunsten die für die Funktion der Städte und Siedlungen notwendigen befestigten Oberflächen zu wenig. Neue Baugebiete sollten jedoch so geplant und gebaut werden, dass im Interesse des Stadtklimas eine möglichst hohe Verdunstung beibehalten wird. Auch bei Sanierungsarbeiten in bestehenden Gebieten ist eine Erhöhung der Verdunstung anzustreben. Allerdings ist die Umsetzung hier wesentlich schwieriger.

Aufgrund der starken Konkurrenz zwischen den Flächennutzungen stellt sich die Frage, mit welchen Maßnahmen am meisten erreicht werden kann. Ausgehend von den physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Verdunstungsprozesses wird die Verdunstungshöhe bestimmt durch

- die Wasserverfügbarkeit,
- die Energieverfügbarkeit und
- den Verdunstungsanspruch der Luft.

Die größten Veränderungen in bebauten Gebieten ergeben sich im Vergleich zu natürlichen Flächen in der Wasserverfügbarkeit. Die Hauptursachen dafür sind:

1. Versiegelte Oberflächen bewirken ein schnelles Abfließen der Niederschläge, so dass weniger Wasser für den vergleichsweise langsamen Verdunstungsprozess zur Verfügung steht.
2. Der geringe Anteil bewachsener Flächen in bebauten Gebieten reduziert die Wassermenge, die aus den oberen Bodenschichten entnommen werden kann. Das Wasser aus diesen Schichten wäre sonst von den Pflanzen innerhalb des Wurzelraumes aufgenommen und über die Transpiration an die Atmosphäre abgegeben worden.

Die größten Differenzen ergeben sich bei Starkniederschlägen, da hier der Abflussanteil versiegelter Oberflächen sehr hoch ist, während von bewachsenen Flächen erst bei extremen Niederschlagsereignissen ein erheblicher Oberflächenabfluss auftritt.

Im Gegensatz zur Wasserverfügbarkeit sind die Energieverfügbarkeit und der Verdunstungsanspruch der Luft in bebauten Gebieten in den meisten Fällen höher als bei natürlichen Flächen. Zusätzliche Energie steht durch eine niedrigere Albedo und das hohe spezifische Wärmespeichervermögen vieler künstlicher Materialien (Beton, Mauerwerk, Asphalt) zur Verfügung. Der höhere Verdunstungsanspruch der Luft, dessen Höhe von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit abhängt, ist eine direkte Folge der insgesamt niedrigeren Verdunstung bebauter Gebiete.

Entscheidend ist damit die Wasserverfügbarkeit. Natürliche bewachsene Flächen speichern das Wasser in den oberen Bodenschichten und durch die Interzeption an den Blattoberflächen. Diese beiden Funktionen werden durch die Versiegelung stark eingeschränkt. Für die

Zwischenspeicherung sind deshalb neue Möglichkeiten zu schaffen. Als teilweiser Ausgleich können die Landnutzungsarten dienen, die eine besonders hohe Zwischenspeicherung des Niederschlagswassers ermöglichen. Das sind:

1. Wasserflächen
2. Dachbegrünungen
3. Pflanzen
4. Zeitweise wassergefüllte Mulden

Eine Zusammenfassung der Wirkungen und Eigenschaften dieser städtebaulichen Elemente ist am Ende des Kapitels in Tabelle 3-5 dargestellt.

### **Wasserflächen**

Wasserflächen können die Verringerung der Verdunstung durch die Versiegelung in bebauten Gebieten teilweise ausgleichen. Ihre Evaporationsleistung liegt über der der meisten bewachsenen Flächen, da die Wasserverfügbarkeit nicht begrenzt ist und die zur Verfügung stehende Energie vollständig ausgenutzt werden kann.

Zudem ergeben sich mit dem Element "Wasser" durch die Anlage kleiner Wasserflächen in Verbindung mit offenen Zuläufen in der Form von Gräben und Mulden ausgezeichnete Gestaltungsmöglichkeiten in Siedlungsgebieten.

Die höchste Verdunstung können dabei kleine, flache und an den Randbereichen mit Röhricht bewachsene Wasserflächen erreichen. Ursachen dafür sind der „Oaseneffekt“ bei kleinen Wasserflächen, die hohen Wasseroberflächentemperaturen flacher Gewässer und die sehr hohe Evapotranspiration von Röhricht.

Aus der Sicht der Erhöhung der Verdunstung sollte diese Wasserfläche in bebauten Gebieten folgende Eigenschaften haben:

- ständiger Wasserstand auf einer Fläche von 200 bis 300 m<sup>2</sup>
- flache Randbereiche mit Wassertiefen bis 1 m,
- mit Röhricht bewachsene Randbereiche
- mit Gras und Sträuchern bewachsener flacher Stauraum für die Zwischenspeicherung von Starkniederschlägen

Aus der Sicht der Artenvielfalt und Stabilität des Ökosystems wären größere Wasserflächen wünschenswert, diese sind jedoch innerhalb bebauter Gebiete aufgrund der Konkurrenz mit anderen Nutzungsarten schwer durchzusetzen.

Die Anlage eines mit Rasen und Sträuchern bewachsenen Rückhalteraums durch einen entsprechend hoch angeordneten Überlauf gewährleistet eine gute Wasserversorgung der dort wachsenden Pflanzen. Die dadurch mögliche hohe Verdunstung sichert in Verbindung mit

der Versickerung eine schnelle Entleerung des Speicherraums je nach Niederschlagsmenge innerhalb weniger Stunden oder Tage.

Bei Mulden-Rigolen-Systemen kann die Verdunstung durch das Vorschalten von kleinen Teichen deutlich erhöht werden. Die Teiche wirken als zusätzlicher Speicher. Erst bei Vollauffüllung fließt der Überlauf in die über der Rigole gelegene Versickerungsmulde. Gleichzeitig verlängert sich durch die gute Sedimentationswirkung von Teichen die Lebensdauer der Rigole infolge der Reduzierung des Feststoffeintrags.

Die Renaturierung verrohrter Fließgewässer leistet ebenfalls einen Beitrag zur Erhöhung der Verdunstung und zur Verbesserung des Stadtklimas. Erforderlich ist dazu neben der Offenlegung und naturnahen Gestaltung des Gewässerlaufs die Freihaltung ausreichend großer Auenbereiche. Zwar ist die Wasseroberfläche der Fließgewässer vergleichsweise gering, jedoch ergibt sich eine erhebliche zusätzliche Wirkung durch die hohe Verdunstung der gut mit Wasser versorgten Auenpflanzen. Zudem bieten diese Flächen bei Starkniederschlägen ein hohes Retentionspotenzial.

### Dachbegrünung

Die Änderungen der Wasser- und Energiebilanz durch die Begrünung von Dächern sind bezogen auf die betreffende Teilfläche sehr hoch, da bei konventionellen Dächern diese Fläche vollständig versiegelt ist. Dagegen sind Gebiete, auf denen Versickerungsmulden und Wasserflächen angelegt werden, ohne diese Nutzung meist auch bereits Grünflächen mit einem hohen Verdunstungsanteil.

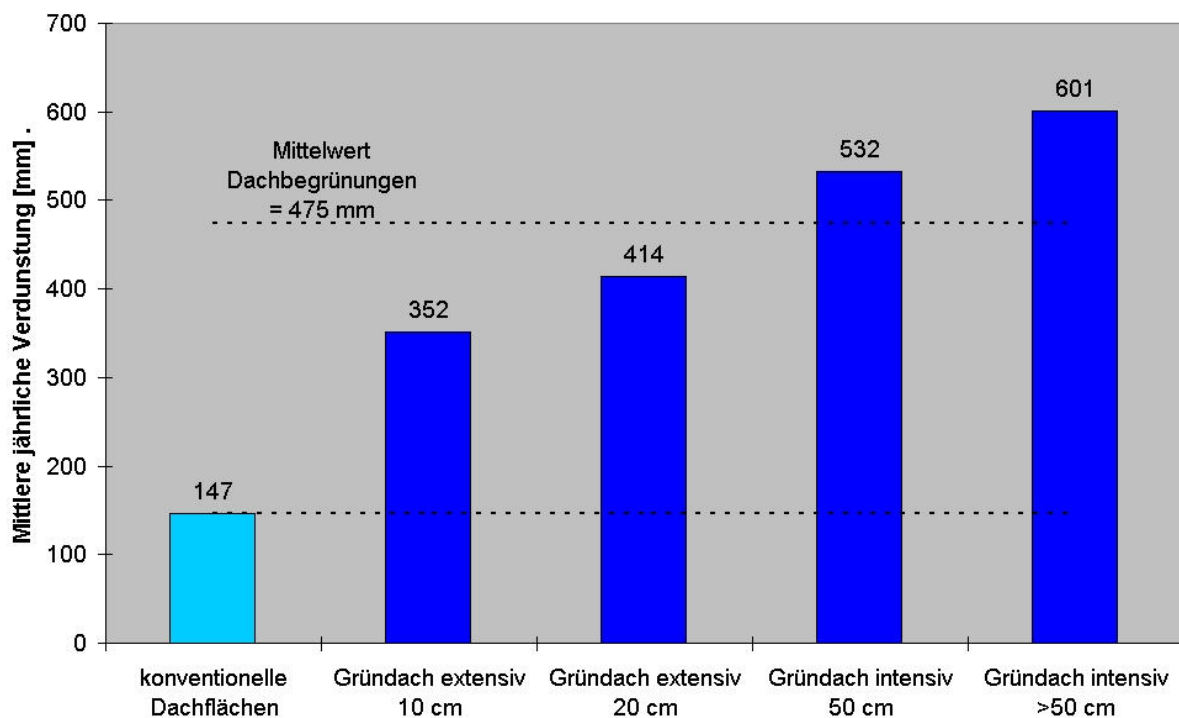


Bild 3-27

Vergleich der mittleren jährlichen Verdunstungshöhen konventioneller Dachflächen und Dachbegrünungen verschiedener Aufbaustärken

Während die mittlere jährliche Verdunstung von konventionellen Dachflächen für den fiktiven mittleren Standort in der Bundesrepublik bei 147 mm liegt, erreichen bereits extensive Dachbegrünungen mit Aufbaustärken bis 10 cm eine 2,4-fach höhere Verdunstung. Bei intensiven Dachbegrünungen mit Aufbaustärken über 50 cm kann mehr als viermal soviel verdunsten (Bild 3-27).

Bezogen auf die Gesamtfläche bebauter Gebiete sind die Auswirkungen jedoch bisher nur gering, da der Flächenanteil der Dachbegrünungen minimal ist. Als Ursache werden meist die vermeintlich höheren Kosten durch größere Dachlasten und zusätzlichen Unterhaltungsaufwand genannt. Diese Argumente treffen allerdings nur bei intensiven Dachbegrünungen mit hohen Aufbaustärken zu. Wie Untersuchungen von Hämmerle [2002] und Köhler [2004] zeigen, verursachen extensive Gründächer langfristig keine höheren Kosten. Zusätzliche Dachlasten treten bei Aufbauhöhen bis 10 cm ebenfalls nicht auf. Gründächer mit dieser Aufbaustärke können jedoch bereits fast die Hälfte des Jahresniederschlags über Verdunstung in den Wasserkreislauf zurückgeben.

Die Jahresbilanzen des Wasser- und Energiehaushaltes von Dachflächen werden durch Gründächer den Bilanzen von natürlichen Flächen wieder angenähert. Die dauerhaften nachteiligen Auswirkungen der Bebauung auf den Naturhaushalt können damit verringert werden.

Die Dimensionierung der Entwässerungseinrichtungen mittels Starkregenereignissen bleibt allerdings unverändert. Ein zusätzlicher Rückhalt kann bei extensiven Dachbegrünungen nicht angesetzt werden. Das Speichervermögen ist bei kurz aufeinander folgenden Niederschlägen schnell erschöpft und es ist nicht auszuschließen, dass ein Bemessungsregen auf ein bereits mit Wasser gesättigtes Gründach fällt.

Intensive Dachbegrünungen mit Aufbaustärken über 50 cm weisen Wasser- und Energiebilanzen auf, die weitgehend denen natürlicher bewachsener Flächen entsprechen. Der Rückhalt ist sehr groß, so dass bei der Bemessung der Entwässerungsanlagen von einer spürbaren Verzögerung des Abflusses ausgegangen werden kann. Aufgrund der im Vergleich zu extensiven Dachbegrünungen deutlich höheren Kosten werden sie jedoch weiterhin die Ausnahme bleiben.

Neben der Begrünung von Dachflächen existieren auch architektonische Lösungen mit teilweise durch Erde überdeckte Häuser und Garagen („Parkhügel“). Diese Flächen haben die gleiche Wirkung wie intensive Dachbegrünungen.

## **Pflanzen**

Die jährliche Verdunstung von Pflanzen liegt deutlich über der versiegelter Flächen. Sie kann dabei in Städten in Abhängigkeit vom Standort höher oder niedriger als in natürlichen Gebie-

ten sein. Bei günstigen Standortbedingungen mit guter Wasserversorgung, zum Beispiel durch einen geringen Grundwasserflurabstand, ist aufgrund der in urbanen Gebieten mehr zur Verfügung stehenden Energie eine höhere Jahresverdunstung möglich. Dagegen liegen beispielsweise die Verdunstung von stark genutzten Rasenflächen, mit dadurch verursachter hoher Bodenverdichtung, und die Verdunstung von Bäumen mit bis an den Stamm reichender Versiegelung unter der vergleichbarer natürlicher Flächen.

Die Evapotranspiration steigt mit zunehmender Pflanzengröße, so dass Bäume mehr verdunsten als Wiesen und Sträucher. Nach Fezer [1995] geht in urbanen Gebieten die beste klimatische Wirkung von Parkanlagen mit ihrer Kombination aus breitkronigen Bäumen, Sträuchern und Rasenflächen aus. Letztere sind wichtig für den Luftaustausch zwischen der Grünanlage und der angrenzenden Bebauung. Generell haben alle Grünflächen einen hohen Verdunstungsanteil. Am effektivsten sind dabei Einzelbäume und Baumgruppen an gut mit Wasser versorgten Standorten.

### **Zeitweise wassergefüllte Mulden**

Eine weitere wirksame Möglichkeit zur Zwischenspeicherung des Niederschlagswassers sind Mulden und Gräben. Sie sind ein wichtiges Element der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung, deren Schwerpunkt auf der Versickerung liegt.

Temporär mit Wasser gefüllte Mulden und Gräben können zwei Funktion erfüllen:

- Offene Ableitung von Niederschlagswasser
- Zeitweiliger Einstau mit anschließender Versickerung

Die offene Ableitung des Niederschlagswassers ermöglicht die Verzögerung des Abflusses und die Reduzierung der Abflussmenge durch Versickerung und Verdunstung. Dazu sind raue Sohl- und Böschungsflächen herzustellen sowie lange Fließwege anzustreben. Diese Abflussreduzierung während des Transportes kann sowohl durch bewachsene Gräben und Mulden als auch durch künstliche Befestigung mit Pflasterrinnen oder Formsteinen mit Störelementen innerhalb versiegelter Flächen erfolgen. In der Jahresbilanz sind damit spürbare Effekte erreichbar. Für Starkniederschläge muss die Dimensionierung dieser Entwässerungsanlagen jedoch weiterhin mit den üblichen Bemessungsregenereignissen erfolgen, da die langsam ablaufenden Prozesse der Versickerung und Verdunstung dafür keine Entlastung bringen. Je nach Gestaltung und Abmessung der Gräben ist die Berücksichtigung des dadurch entstehenden Speichervolumens möglich.

Die Zeitdauer des Einstaus soll bei Versickerungsmulden und Mulden-Rigolen-Systemen auf wenige Stunden begrenzt sein, da eine lange Einstauzeit die Kolmation begünstigt und dadurch die Durchlässigkeit des Bodens sinkt. Die höhere Verdunstungsleistung von Versickerungsmulden stammt deshalb nur zu einem geringen Teil aus der Evaporation der



Wasseroberfläche. Es überwiegt die erhöhte Verdunstung der mit zusätzlichem Wasser gut versorgten Grasflächen. Um bei diesem Entwässerungssystem die positive Wirkung von Wasserflächen auf das Mikroklima zu nutzen, sollten den Versickerungsmulden und Rigolen kleine Teiche vorgeschaltet werden. Erst nachdem das Speichervolumen des Teiches gefüllt ist, würde dann der Überlauf in die Versickerungsmulde fließen.

### **Erreichbare Verbesserungen**

Die maximal erreichbaren Verbesserungen werden durch technische und nichttechnische Grenzen beschränkt [DWA 2003]. Technische Grenzen sind in diesem Fall die physikalischen Bedingungen für die Verdunstung. Sie können nicht überwunden werden. Der Begriff „nichttechnische Grenzen“ umfasst Zuständigkeiten, administrativen Festlegungen, rechtlichen Bedingungen sowie die Meinungen und Ansichten aller Betroffenen und Beteiligten. Dabei handelt es sich um subjektive Grenzen, die prinzipiell überwindbar sind.

Die technische Grenze für den Ausgleich der reduzierten Verdunstung ist die von der verfügbaren Energie abhängige maximale Verdunstung. Selbst bei einer darüber hinaus gehenden Wasserbereitstellung ist keine weitere Erhöhung der Verdunstung möglich.

Die Flächenverfügbarkeit kann sowohl als technische Grenze bei einer Beschränkung zum Beispiel durch das Relief als auch als nichttechnische Grenze bei fehlender Bereitschaft der Ausweisung der notwendigen Flächen auftreten.

Generell besteht ein Interessenkonflikt zwischen den für die intensive urbane Nutzung mit Gebäuden, Straßen und Wegen versiegelten Flächen einerseits sowie den für die Aufrechterhaltung eines möglichst naturnahen Wasserhaushalts andererseits erforderlichen Flächen. Zur Überwindung nichttechnischer Grenzen ist deshalb bereits frühzeitig eine umfassende Einbeziehung aller Beteiligten notwendig. Die Planung neuer Baugebiete muss von Anfang an auf das Ziel der Minimierung des Eingriffs in den Naturhaushalt ausgerichtet werden, um rechtzeitig die dafür benötigten Flächen bereitzustellen. Maßgebend für den Umfang der Verdunstungsreduzierung ist der Versiegelungsgrad. In Gebieten mit sehr hoher Oberflächenversiegelung ist ein spürbarer Ausgleich der reduzierten Verdunstung trotz der aufgeführten Maßnahmen nicht möglich.

In bestehenden urbanen Gebieten ist der Gestaltungsspielraum gering. Realistische Chancen können sich im Rahmen des Stadtumbaus infolge der demografischen Entwicklung und bei der Sanierung innerstädtischer Brachflächen ergeben. Der Anteil innerstädtischer Brachen steigt gegenwärtig täglich um etwa 19 ha und umfasste im Jahr 2000 bereits eine Fläche von 139 000 ha [UBA 2004]. Die beim Abriss nicht mehr benötigter Wohngebäude und durch Industriebrachen frei werdenden Flächen sollten für eine naturnahe Regenwasserbewirtschaftung der angrenzenden Gebiete mit dem Ziel einer möglichst hohen Verdunstung genutzt werden.

Im Bild 3-28 sind die Verdunstungsraten der vorgestellten Möglichkeiten zur Verdunstungserhöhung im Vergleich zur Verdunstung versiegelter Flächen dargestellt. Die mittlere jährliche Verdunstungshöhe versiegelter Flächen beträgt 196 mm. Pflanzen und Wasserflächen erreichen dagegen mit durchschnittlich 595 mm eine 3-fach höhere Verdunstung. Das erscheint viel, muss jedoch mit der Verdunstung von Ackerflächen und Wiesen verglichen werden, da neue Baugebiete überwiegend auf diesen Landnutzungsarten angelegt werden. Deren mittlere jährliche Verdunstungshöhen betragen 542 und 506 mm. Der Mittelwert der Verdunstung bewachsener Flächen in bebauten Gebieten liegt mit 535 mm/a nur etwa 10 % darüber. Ein spürbarer Ausgleich für die Verdunstungsreduzierung versiegelter Oberflächen ist damit nicht möglich. Eine deutlich die Werte von Ackerflächen und Wiesen überschreitende Verdunstung erreichen nur Wasserflächen und Einzelbäume an gut mit Wasser versorgten Standorten.

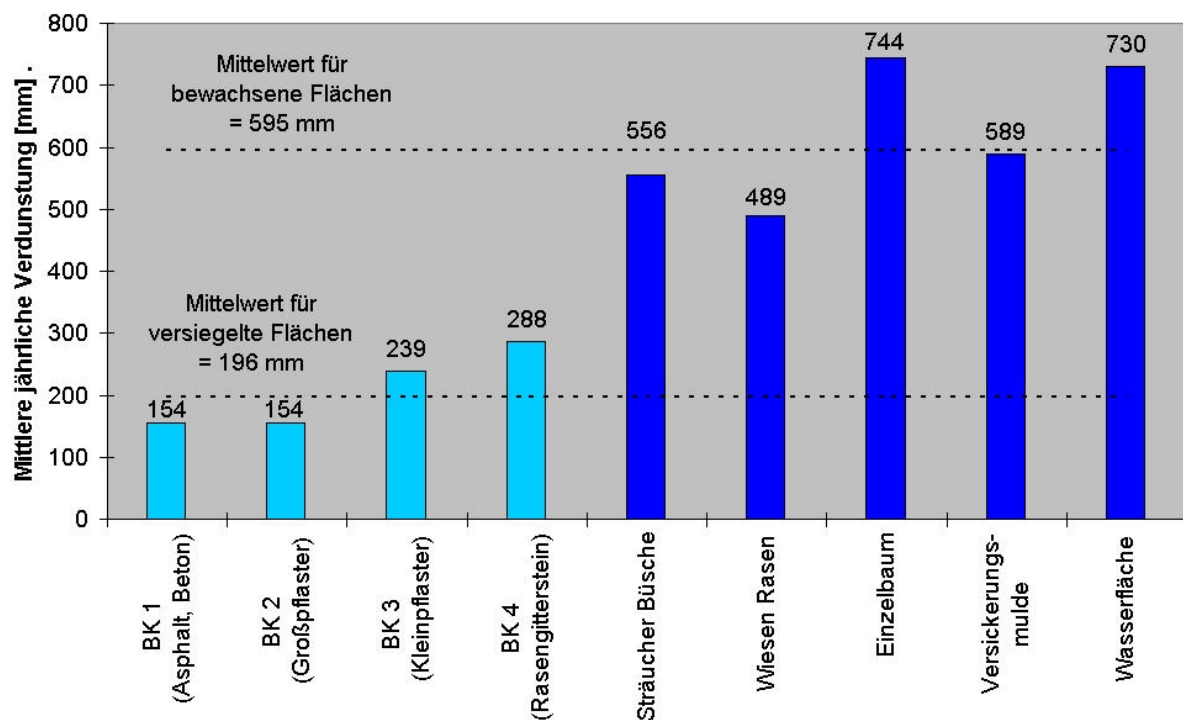


Bild 3-28 Vergleich der mittleren jährlichen Verdunstungshöhen versiegelter und bewachsener Flächen in urbanen Gebieten

Da ein spürbarer Ausgleich schwer zu erreichen ist, muss von Anfang an auf einen möglichst geringen Versiegelungsgrad orientiert werden. Das mit Abstand wirksamste Element sind dabei Dachbegrünungen anstelle der konventionellen Befestigung mit Dachsteinen oder Schiefer.

Die in der Bundesrepublik Deutschland unter den Begriffen „Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung“ und „Nachhaltige Infrastrukturplanung“ angewandten Ansätze werden sowohl in den Ländern der Europäischen Union als auch weltweit mit verschiedenen Bezeichnungen aber ähnlichen Ansätzen verfolgt. Im englischsprachigen Raum lauten die entsprechenden Begriffe „SUDS - Sustainable Urban Drainage System“, „SuDS - Sustainable Drainage System“ (ohne Beschränkung auf städtische Gebiete) oder „LID - Low Impact Development“.

Ziel ist bei allen Ansätzen die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt infolge der Bebauung so gering wie möglich zu halten. Dazu sollen eine breite Anwendung finden:

- offene Wasserführung (Rückhaltung, Versickerung und Verdunstung beim Transport)
- Zwischenspeicherung in Mulden, Teichen, Feuchtgebieten
- Einzelbäume und Baumgruppen mit guter Wasserversorgung
- Versickerung über Gräben, breite Mulden und Rigolen
- Vermeidung der Versiegelung durch die Anwendung durchlässiger Oberflächen
- Dachbegrünungen

Ansatz ist bei allen Programmen die Zwischenspeicherung des Niederschlagswassers für die anschließenden langsamen Prozesse der Versickerung und Verdunstung.

Tabelle 3-5 Zusammenstellung der Wirkungen und Eigenschaften der wirksamsten Elemente zur Erhöhung der Verdunstung in bebauten Gebieten

Städtebauliches Element	Wirkung	Einschätzung
Teiche	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zwischenspeicherung großer Niederschlagsmengen durch Aufstau</li> <li>- hoher Versickerungsanteil in durchlässigen Aufstauflächen</li> <li>- Reinigung des Wassers bei der Versickerung über die belebte Bodenzone</li> <li>- sehr hohe Verdunstungsraten</li> <li>- Verbesserung Stadtklima</li> <li>- städtebauliches Gestaltungselement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoher laufender Unterhaltungsaufwand</li> <li>- Konkurrenz mit anderen Flächennutzungen</li> <li>- geeignete Topografie erforderlich</li> </ul>
Teiche mit Wasserpflanzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zwischenspeicherung großer Niederschlagsmengen durch Aufstau</li> <li>- hoher Versickerungsanteil in durchlässigen Aufstauflächen</li> <li>- Reinigung des Wassers bei der Versickerung über die belebte Bodenzone</li> <li>- höchste Verdunstung infolge der Vergrößerung der Oberfläche durch Pflanzen</li> <li>- Verbesserung Stadtklima</li> <li>- städtebauliches Gestaltungselement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoher laufender Unterhaltungsaufwand</li> <li>- Konkurrenz mit anderen Flächennutzungen</li> <li>- geeignete Topografie erforderlich</li> <li>- Ufersicherung durch Schilf</li> </ul>
extensive Dachbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rückhalt von ca. 50% des Jahresniederschlags durch Verdunstung</li> <li>- Verbesserung Mikroklima</li> <li>- Minderung der Temperaturamplituden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringer Unterhaltungsaufwand</li> <li>- kaum bis keine zusätzlichen Dachlasten</li> <li>- keine (!) Konkurrenz mit anderen Flächennutzungen</li> <li>- kaum Rückhaltung bei Starkniederschlägen</li> </ul>
intensive Dachbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rückhalt von 60 bis 70% des Jahresniederschlags durch Verdunstung</li> <li>- vergrößertes Speichervermögen durch höhere Aufbaustärke</li> <li>- Verbesserung Mikroklima</li> <li>- Minderung der Temperaturamplituden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kostenintensiv</li> <li>- laufender Unterhaltungsaufwand</li> <li>- zusätzliche Dachlasten - Anwendung nur bei Neubauten</li> <li>- keine (!) Konkurrenz mit anderen Flächennutzungen</li> <li>- geringe Rückhaltung bei Starkniederschlägen</li> </ul>
Einzelbäume / Baumgruppen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zwischenspeicherung durch Interzeption und Rückhalt im Boden</li> <li>- sehr hohe Verdunstungsleistung bei guter Wasserversorgung</li> <li>- Verbesserung Stadtklima</li> <li>- städtebauliches Gestaltungselement</li> <li>- höhere Verdunstung bei Einzelbäumen im Vergleich zum geschlossenen Bestand durch Oaseneffekt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gute Wasserversorgung über große Baumscheiben erforderlich</li> <li>- Konkurrenz mit anderen Flächennutzungen</li> <li>- Nadelbäume verdunsten mehr als Laubbäume</li> <li>- relativ geringer Unterhaltungsaufwand</li> </ul>
Versickerungsmulden / offene Wasserführung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zwischenspeicherung in Mulden und Gräben</li> <li>- Abflussreduzierung beim Transport durch Verzögerung, Versickerung und Verdunstung</li> <li>- Verbesserung Stadtklima</li> <li>- städtebauliches Gestaltungselement</li> <li>- Reinigung des Wassers bei der Versickerung über die belebte Bodenzone</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- laufender Unterhaltungsaufwand</li> <li>- Konkurrenz mit anderen Flächennutzungen</li> <li>- Bemessung für Starkregenereignisse</li> <li>- Wasserableitung bei Überlastung in der Planung untersuchen</li> <li>- geeignete Topografie erforderlich</li> <li>- kostengünstiger als Rohrleitungen</li> </ul>

## **4 Anwendungsbeispiele**

Die beiden Anwendungsbeispiele sind in ihrer Struktur und Landnutzung sehr unterschiedlich. Zum einen die Neuerschließung des Industrie- und Gewerbegebietes „Goldene Höhe“ in der Stadt Treuen im Vogtlandkreis auf einer bisher land- und forstwirtschaftlich genutzten Fläche und zum anderen der Bau eines unterirdischen Bahnhofes in der dicht bebauten Innenstadt von Malmö in der südschwedischen Region Skåne. Für beide Gebiete werden die Auswirkungen der Landnutzungsänderungen auf den Wasser- und Energiehaushalt untersucht.

Die Bestimmung der Verdunstung der Landflächen erfolgt mit dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren. Die Evaporation der Wasserflächen wird mit dem Temperaturgleichgewichtsverfahren ermittelt.

Die Berechnungen wurden im Excel-Tabellenkalkulationsprogramm ausgeführt. Die Lösung einzelner Verfahrensschritte sowohl des BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahrens als auch des Temperaturgleichgewichtsverfahrens sind nur durch Iteration möglich. Für eine einfache Berechnung, wurden deshalb die Algorithmen beider Verfahren mithilfe der VBA-Programmiersprache in das Excel-Tabellenkalkulationsprogramm eingearbeitet und teilweise automatisiert. Mit der Nutzung eines weit verbreiteten und allgemein bekannten Programms entfällt die aufwändige Einarbeitung in eine neue Software.

Im Berechnungsprogramm sind alle Landnutzungsarten mit ihren speziellen Verfahren enthalten. Die Struktur des VBA-Programms und weitere Erläuterungen sind im Anhang A aufgeführt.

Die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen Teilflächen mit unterschiedlichem hydrologischem Verhalten ist gegenwärtig noch nicht möglich. Zur Vereinfachung und besseren Übersichtlichkeit können deshalb Teilflächen mit der gleichen Oberflächennutzung unabhängig von den gegenseitigen Lagebeziehungen zusammengefasst werden. Die Summierung der Wasser- und Energiehaushaltsgrößen für das gesamte Einzugsgebiet wird nicht durch einfache Summierung der Teilflächen sondern über das gewichtete Mittel des Anteils der Teilflächen an der Gesamtfläche ausgeführt.

#### 4.1 Auswirkungen der Landnutzungsänderung durch die Erschließung des Industrie- und Gewerbegebietes „Goldene Höhe“ in Treuen, Vogtlandkreis

Die Stadt Treuen hat seit Beginn der 1990-iger Jahre die Industrie- und Gewerbegebiete „Goldene Höhe - Teilgebiete 1 bis 3“ geplant und zum großen Teil erschlossen (Bild 4-1). Die Gesamtfläche der genehmigten Industrie- und Gewerbegebiete beträgt 95 Hektar. Bedingt durch die günstige Lage unmittelbar an der Autobahn A72 sind die Teilgebiete 1 und 2 bereits fast vollständig besiedelt, das Teilgebiet 3 begonnen.

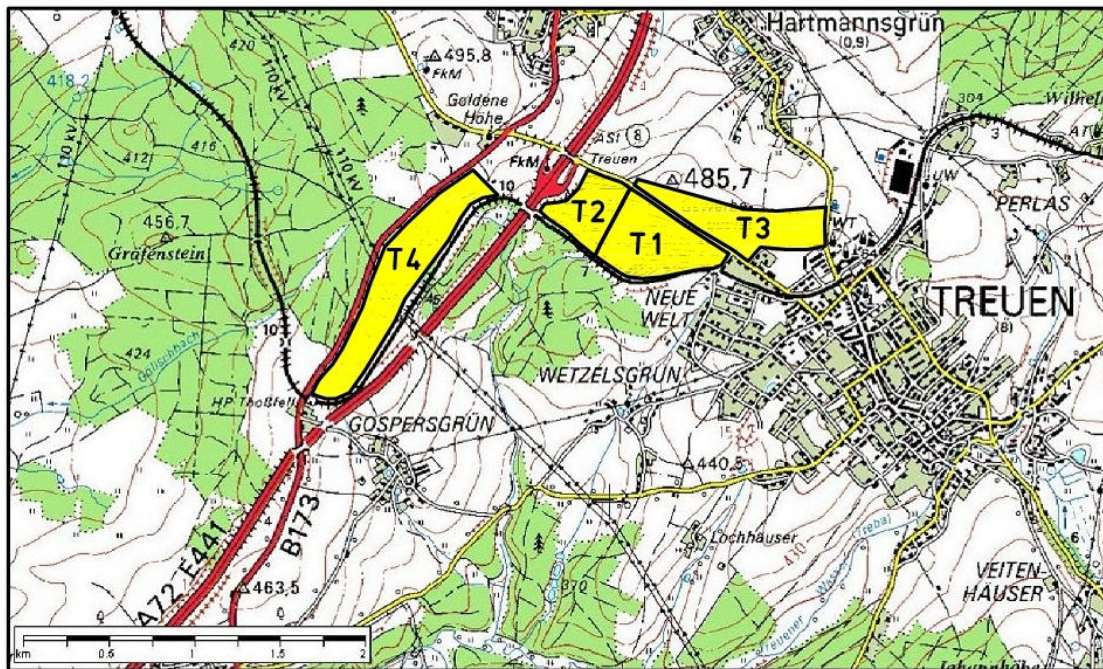


Bild 4-1 Übersichtslageplan des Industrie- und Gewerbegebietes „Goldene Höhe“ Teilgebiete T1 bis T4 der Stadt Treuen

Im Jahr 2001 begann die Aufstellung des Bebauungsplans für das Teilgebiet 4 mit dem Ziel, großflächige Industriestandorte anbieten zu können. Der Bebauungsplan umfasst eine Fläche von 43,3 ha. Diese setzt sich zusammen aus 27,0 ha Industriegebiet, 7,7 ha Gewerbegebiet, 1,3 ha öffentliche Verkehrsfläche und 7,3 ha öffentliche Grünfläche.

Die Erschließungsarbeiten für den südwestlichen Abschnitt des Teilgebietes 4 wurden 2002 ausgeführt. Auslöser war die geplante Ansiedlung der Firma Magnetto - Automotive Deutschland GmbH. Dazu wurde eine Fläche von 13 Hektar benötigt. Inzwischen haben sich im Umfeld zwei weitere Industriebetriebe angesiedelt, so dass nun 26,1 ha oder 60 % des Teilgebietes 4 genutzt werden.

Die Erschließung der verbleibenden 17,2 ha des Industrie- und Gewerbegebietes ist noch nicht erfolgt. Diese Flächen werden weiterhin landwirtschaftlich als Ackerfläche und Dauergrünland genutzt. Da Baurecht vorliegt, kann die Erschließung bei Bedarf innerhalb kurzer Zeit erfolgen.



### 4.1.1 Ausgangssituation

#### Geografische Situation

Die Stadt Treuen liegt im Süd-Westen Sachsens, etwa in der Mitte zwischen den Städten Plauen und Zwickau. Das Industrie- und Gewerbegebiet „Goldene Höhe - Teilgebiet 4“ befindet sich zirka 5 km westlich der Stadt Treuen. Im Osten und Südosten grenzt es an die Bahnlinie Falkenstein - Herlasgrün und die Autobahn A72 und im Nordwesten an die Bundesstraße B173.

Das Gebiet liegt auf einem Höhenrücken zwischen den Tälern der Göltzsch und der Trieb (Bild 4-2). Die Höhenlage reicht von 478 bis 460 m ü. HN. Der westliche Teil des Gebietes ist weitgehend eben. Im östlichen Teil fällt das Gelände mit einer Neigung von bis zu 5 % in östliche Richtung ein.



*Bild 4-2*      Luftbild des Industrie- und Gewerbegebietes „Goldene Höhe“ in Treuen  
(im Vordergrund Teilgebiet 4, im Hintergrund Teilgebiete 1 bis 3)  
Quelle: Landratsamt Vogtlandkreis

#### Klimadaten

Das Vogtland gehört zur gemäßigten und feuchten Westwindzone Mitteleuropas mit einer typischen wechselhaften Witterung. Aufgrund des größeren Abstands zum Atlantik ist das Klima bereits kontinentaler geprägt als in den westlichen Landesteilen Deutschlands. Die Sommer sind trockener und die Winter kälter. Weiterhin wird das Klima durch die Mittelgebirgslage mit Höhen zwischen 400 und 1000 m ü. HN beeinflusst.

Als Klimadaten werden langjährige Mittelwerte des Zeitraums 1961 - 1990 genutzt (Tabelle 4-1). Die Niederschlagsdaten stammen von der unmittelbar benachbarten Station Thossfell (Entfernung 2 km). Die tatsächliche Sonnenscheindauer und die Lufttemperatur werden als Mittelwert aus den Stationen Plauen (Entfernung 12 km, südwestlich, 386 m ü. HN) und Schnarrtanne - Vogelsgrün (Entfernung 14 km, südöstlich, 708 m ü. HN) errechnet. Die An-

gaben zur Luftfeuchtigkeit stammen von der Station Hof und die zur Windgeschwindigkeit von der Stadt Falkenstein.

Tabelle 4-1 Mittlere langjährige Klimadaten der Zeitreihe 1961 - 1990 für Treuen

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lufttemperatur, $T$ [°C]	-2,3	-1,5	1,9	5,8	10,8	14,0	15,7	15,2	12,3	8,0	2,6	-1,0
Luftfeuchtigkeit, $U$ [%]	85	83	79	75	72	73	72	75	79	82	85	86
Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe, $v_{2m}$ [m/s]	3,5	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	3,0	4,0	3,5
Tägliche Sonnenscheindauer, $S$ [h/d]	1,6	2,4	3,3	4,5	5,4	5,8	5,9	5,6	4,8	3,9	1,9	1,3
Astronomisch mögliche Sonnenscheindauer, $S_0$ [h/d]	8,6	10,1	11,9	13,8	15,4	16,3	15,9	14,4	12,6	10,8	9,1	8,2
Extraterrestrische Strahlung, $R_0$ [W/m²]	107	170	265	367	445	481	463	398	304	204	125	89
Korrigierter Niederschlag, $P_{kor}$ [mm]	48,1	44,8	51,2	67,9	80,2	91,1	85,7	87,2	62,6	54,1	54,8	59,2

Die Berechnungen werden mit folgenden Klimadaten ausgeführt:

- Mittlerer Jahresniederschlag  $P_{kor}$  787 mm
- Niederschlag Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober)  $P_{kor, SHJ}$  461 mm
- Gras-Referenzverdunstung  $ET_0$  500 mm
- Mittlere Lufttemperatur  $T$  6,8 °C
- Mittlere tatsächliche Sonnenscheindauer  $S$  1412 h

### Geologische und hydrologische Situation

Regionalgeologisch befindet sich der Standort im thüringisch-vogtländischen Schiefergebirge. Das Grundgebirge besteht aus Tonschiefer in Form von Phyllit. Dieser wird überlagert durch Lockergesteinsschichten aus Hanglehm und Hangschutt [Ingenieurbüro Köbsch 2002]. Gemäß Baugrunduntersuchung steht kompakter Fels in Tiefen zwischen 1,7 und 4,0 m an. Der Oberboden kann als Pseudogley-Braunerde eingestuft werden [Unger et al. 2004]. Er besteht aus grusführendem Lehm und Schluff sowie Lehmschutt und Sandgrus. Im Baugrundgutachten für die Erschließung des Gebietes wird der Oberboden als humoser, sandiger und schwach kiesiger Schluff mit lockerer Lagerung eingeordnet. Für diese Bodenart wird in Tafel 9.10 des DWA Merkblattes 238 „Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen“ [DWA 1996] eine nutzbare Feldkapazität von 27,0 Volumen-% angegeben. Dieser Wert ist sehr hoch und entspricht dem von Lößböden.

Ein einheitlicher Grundwasserleiter kann sich aufgrund der geologischen Situation nicht ausbilden. Das versickerte Wasser bewegt sich als temporäres Kluft- und Schichtenwasser im

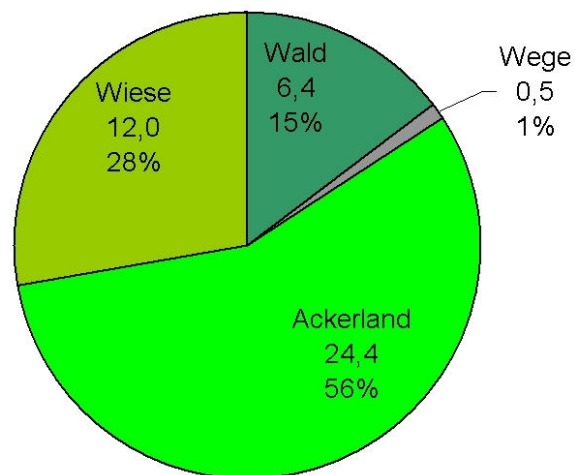


Boden. Die Menge des Wassers schwankt in Abhängigkeit vom Niederschlagsgeschehen und erreicht die höchsten Werte nach der Schneeschmelze und längeren Regenperioden.

Der unter dem Oberboden anstehende Gehängelehm ist nur schwach wasserdurchlässig. Damit ist eine schnelle Versickerung größerer Niederschlagsmengen nicht möglich. Um dennoch Regenwasser versickern zu können, ist eine Zwischenspeicherung durch Rigolen, Mulden oder offene Wasserbecken notwendig.

### Landnutzung vor der Erschließung

Die Fläche wurde vor der Erschließung land- und forstwirtschaftlich genutzt und lediglich von einzelnen unbefestigten Feld- und Waldwegen durchquert. Im Nordosten befand sich eine Feuchtwiese mit Quellgebiet. Die vorhandenen Landnutzungsarten und deren Anteile an der Gesamtfläche sind in Bild 4-3 aufgeführt.



**Bild 4-3**      Anteile der Landnutzungsarten der Ausgangssituation des Teilgebiets 4 an der Gesamtfläche von 43,3 ha [Flächenangaben in ha]

### Festlegungen im Grünordnungsplan des Bebauungsplans

Der Bebauungsplan enthält umfangreiche grünordnerische Festsetzungen [Architekturbüro Leipoldt 2005]. Zudem soll mit den festgelegten Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen der mit der Erschließung verbundene Eingriff in Natur und Landschaft kompensiert werden. Neben Maßnahmen im Geltungsbereich des Bebauungsplans gehören dazu auch Vorhaben innerhalb des Stadtgebietes von Treuen und in angrenzenden Gemeinden.

Die geforderten Begrünungen sind im Grünordnungsplan verbindlich festgelegt. Sie umfassen die Anlage zusammenhängender mit Sträuchern und Bäumen bepflanzter Grünstreifen, Festlegungen zur Anzahl der Großbäume und die Gewährleistung einer natürlichen Sukzession auf 10 m breiten Streifen am nördlichen und östlichen Rand des Gebietes. Der Mindestgrünflächenanteil muss auf privaten Grundstücken 20 % betragen. Für die Überprüfung der

Einhaltung der geforderten dauerhaften Unterhaltung der Grünflächen wurde von der Stadt Treuen ein Fachbüro beauftragt.

Im Grünordnungsplan wird empfohlen, durchlässige Straßenbefestigungen zu bevorzugen und das Dach- und Straßenwasser nach Möglichkeit über Verdunstungs- und Versickerungsbecken, Rigolen oder Rückhaltebecken zu entsorgen.

Die Begrünung von Dachflächen bis 20 % Neigung ist im textlichen Teil des Bebauungsplanes als „ausdrücklich erwünscht“ erwähnt, ohne dass dafür konkrete verpflichtende Festlegungen getroffen werden.

Die Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen erstrecken sich auf einer Fläche von 28,5 Hektar. Sie umfassen innerhalb des Plangebietes die Umwandlung von Ackerflächen in Laubmischwald und außerhalb die Anlage eines Laubmischwaldes auf Nebenflächen der Deponie Zobes, die Renaturierung von Bachläufen sowie die Umgestaltung des Dorfangers Eich und der stillgelegten Lehmgrube Reimersgrün.

#### 4.1.2 Gegenwärtige Situation

Während der südliche Teil des Industrie- und Gewerbegebietes mit Ausnahme einer Parzelle bebaut ist, werden die noch nicht erschlossenen Flächen im nördlichen Teil weiterhin landwirtschaftlich genutzt. Für den Vergleich der Situation vor und nach der Bebauung werden diese noch unveränderten Flächen nicht mit berücksichtigt. Das Untersuchungsgebiet beschränkt sich dadurch auf eine Fläche von 14,04 Hektar.

In diesem Bereich sind drei Firmen angesiedelt, die über eine kurze Erschließungsstraße von 100 m Länge erschlossen sind. Die Flächenanteile der verschiedenen Landnutzungsarten und Oberflächenbefestigungen wurden anhand von Planunterlagen und Luftbildern erfasst. Das Untersuchungsgebiet und die Flächenanteile der Landnutzungsarten sind in Bild 4-4 und Bild 4-5 dargestellt.

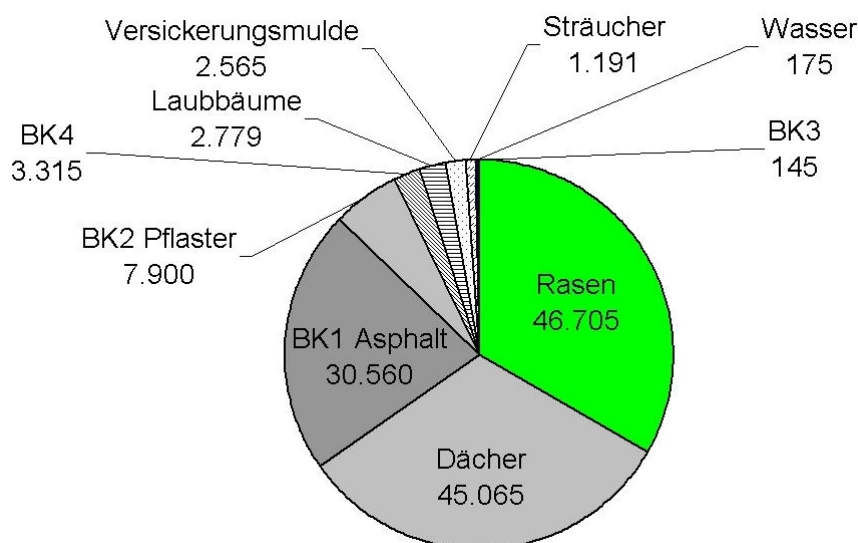


Bild 4-4

Anteile der Landnutzungsarten an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes im Teilgebiet 4, Stand Juli 2007 [Flächenangaben in m²]

Der hohe Anteil von Dach- und Straßenflächen als versiegelte Flächen und von Grünland als unversiegelte Fläche ist typisch für heutige neue Industriegebiete. Alle Dachflächen sind konventionelle Flachdächer. Die Straßen sind bedingt durch die hohen Belastungen aus dem LKW-Verkehr überwiegend mit Asphalt befestigt. Die Pflasterflächen und Flächen mit teilweise durchlässigen Befestigungen beschränken sich auf Stellplätze und Gehwege. Trotz der Einhaltung der Festlegungen im Bebauungsplan ist der Anteil bewachsener Flächen mit Ausnahme der Rasenflächen gering.

Ein Teil der großflächigen Asphaltbefestigungen entwässert in Versickerungsmulden die parallel zur Straßenbefestigung mit Breiten zwischen 2 und 5 m angelegt sind. Die Mulden wurden mit dem vor der Erschließung von der Gesamtfläche abgetragenen Oberboden hergestellt. Als Bodenart wird für die Berechnung sandiger Schluff angenommen.

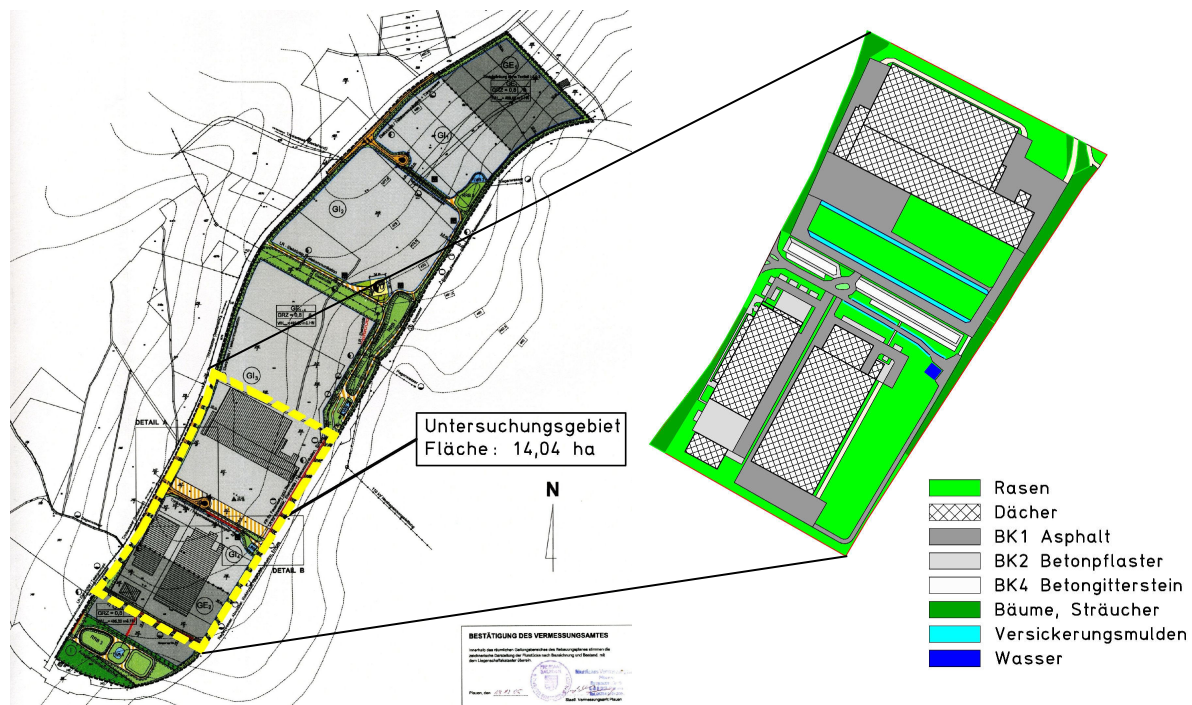


Bild 4-5 Übersichtslageplan Teilgebiet 4 mit Untersuchungsgebiet und Angabe der gegenwärtigen Landnutzungsarten

#### 4.1.3 Hypothetisches Szenario einer verdunstungsorientierten Gestaltung

Neben der Ausgangssituation und dem Ist-Zustand wird zusätzlich ein hypothetisches Szenario untersucht, bei dem ein möglichst hoher Verdunstungsanteil erreicht werden soll. Die vorhandene Bebauung an Gebäuden, Straßen und Stellplätzen wird als Basis angenommen. Zur Erhöhung der Verdunstung werden verändert:

- Begrünung der Dachoberflächen

Es wird angenommen, dass 90 % aller Dachflächen mit einer Dachbegrünung versehen sind. Die verbleibenden 10 % sind Oberlichter, Randanschlüsse und ähnliche Flächen, die nicht begrünt werden können. Die Produktionshallen erhalten extensive Dachbegrünungen mit einer Aufbaustärke von 10 cm. Für die mit den Hallen verbundenen Büro-

und Sozialgebäude werden extensive Gründächer mit Aufbaustärken von 20 cm angenommen. Die Gesamtfläche der Dachbegrünungen erreicht 40 560 m<sup>2</sup>.

- Wasserflächen mit Wasserpflanzen

Innerhalb der nicht bebaubaren Freiflächen werden vier kleine Teiche mit einer Fläche von insgesamt 1 000 m<sup>2</sup> angelegt. Die Randbereiche der Teiche erhalten zur Erhöhung der Verdunstung Schilfgürtel.

Straßen, Stellplätze und Dachabläufe können im freien Gefälle angeschlossen werden. Aufwändige Rohrleitungssysteme sind nicht erforderlich. Die Teiche ermöglichen eine Zwischenspeicherung des Niederschlagswassers bei Starkregenereignissen. Beim Überschreiten des Speichervolumens wird der Überlauf in die Versickerungsmulden geleitet. Neben der Rückhaltung bewirken die Wasserflächen auch eine Sedimentation von Schwebstoffen und gewährleisten so eine dauerhaft hohe Versickerungsleistung der Mulden.

Das Oberflächenwasser der stark befahrenen Zufahrtsstraßen muss vor der Einleitung in die Teiche vorgereinigt werden [DWA 2007]. Dazu werden bewachsene und trocken fallende Versickerungsmulden vor den Teichen angeordnet.

- Versickerungsmulden

Der überwiegende Teil des Untersuchungsgebietes wurde bei der Geländeregulierung im Rahmen der Erschließungsarbeiten mit einem einheitlichen Gefälle von 3 % angelegt. Damit sind günstige Bedingungen für Versickerungsmulden gegeben. Bisher sind Versickerungsmulden nur entlang der Stellplätze im öffentlichen Straßenraum vorhanden, fehlen jedoch vollständig auf den privaten Grundstücken. Aufgrund des hohen Anteils von Rasenflächen einerseits und Asphaltflächen andererseits können aber auch auf diesen Grundstücken ohne Einschränkung der Nutzungsmöglichkeiten Versickerungsmulden angelegt werden. Für das verdunstungsorientierte Szenario werden zusätzliche Versickerungsmulden auf einer Fläche von 7 240 m<sup>2</sup> angenommen.

#### 4.1.4 Auswirkung der Landnutzungsänderungen

Für die einzelnen Landnutzungsarten wurden auf der Basis der erfassten Flächen die langjährigen mittleren Wasser- und Energiebilanzen der Teilflächen berechnet. Die Berechnung erfolgte für die Ausgangssituation, den gegenwärtigen Zustand und für das hypothetische Szenario einer verdunstungsorientierten Gestaltung. Die Änderungen durch die Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen sind separat aufgeführt.

Die Wasserbilanzen wurden mit den drei Hauptkomponenten Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss erstellt. Dazu wurden in einem ersten Schritt die mittleren jährlichen Anteile der Verdunstung für die verschiedenen Oberflächen auf der Basis der langjährigen Klimadaten berechnet. Im zweiten Schritt wurde die verbleibende Niederschlagsmenge in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des anstehenden Bodens auf die Komponenten Versickerung und Oberflächenabfluss aufgeteilt.

Für die Energiebilanzen wurde die verfügbare Energie anhand der Klimadaten ermittelt. Der Anteil der Reflexion wird entsprechend der Albedo der einzelnen Oberflächen berechnet. Anschließend kann mit der in der Wasserbilanz ermittelten Verdunstungsmenge und der für die Verdunstung benötigten spezifischen Energie der Verdunstungswärmestrom ermittelt werden. Als Restgröße verbleibt die fühlbare Wärmeenergiemenge.

Die Auswirkungen der Landnutzungsänderung durch die Erschließung des Industrie- und Gewerbegebietes sind erheblich. Neben den sichtbaren Veränderungen der Natur und des Landschaftsbildes ergeben sich beträchtliche unsichtbare Auswirkungen auf den Wasser- und Energiehaushalt des Gebietes. In Tabelle 4-2 sind die Änderungen der mittleren jährlichen Verdunstung angegeben.

Der Vergleich des Ist-Zustandes mit der Ausgangssituation zeigt eine Reduzierung der Verdunstungsmenge im Untersuchungsgebiet um  $35\,100\text{ m}^3/\text{a}$ . Da sich gleichzeitig auch die Versickerung verringert, erhöht sich die Abflussmenge von  $1\,800\text{ m}^3/\text{a}$  auf  $52\,540\text{ m}^3/\text{a}$ . Die umfangreichen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen außerhalb des Bebauungsplangebietes führen zwar zu einer Erhöhung der Verdunstung in diesen Bereichen um  $18\,800\text{ m}^3/\text{a}$ . Dieser teilweise Ausgleich erfolgt jedoch zulasten der Versickerung dieser Flächen und nicht aus dem erheblichen zusätzlichen Oberflächenabfluss des Baugebietes. Ohne die Berücksichtigung der Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen wird die Verdunstung auf 54 % der Ausgangssituation reduziert. Statt 68 % des Jahresniederschlages verdunsten dann nur noch 37 %. Die Ausgleichsmaßnahmen bewirken, dass rechnerisch der Verdunstungsanteil wieder auf 78 % der Ausgangssituation ansteigt.

Mit dem hypothetischen verdunstungsorientierten Szenario kann zwar gegenüber dem Ist-Zustand die Verdunstungsmenge um  $7\,560\text{ m}^3/\text{a}$  erhöht werden, die Verdunstung der Ausgangssituation kann jedoch nicht annähernd erreicht werden. Ursache ist die geringe Verdunstung der Asphaltflächen und deren hoher Anteil (22 %) an der Gesamtfläche. Außerdem werden die Wasserflächen und Versickerungsmulden auf Flächen angelegt, die sonst mit Rasen bewachsen wären. Da dieser bereits eine hohe Verdunstung aufweist, ist die mögliche Verdunstungserhöhung vergleichsweise gering.

Die Verdunstungsmenge der Dächer steigt am stärksten an und wird von  $6\,170\text{ m}^3/\text{a}$  bei konventionellen Dachbefestigungen auf  $13\,130\text{ m}^3/\text{a}$  bei extensiven Gründächern mehr als verdoppelt.

Die Verdunstung von Wasserflächen die teilweise mit Wasserpflanzen bewachsen sind ist zwar sehr hoch, jedoch ist ihr Flächenanteil mit  $1\,000\text{ m}^2$  bei einer Gesamtfläche von  $140\,400\text{ m}^2$  sehr klein, so dass kein spürbarer Einfluss möglich ist.

**Tabelle 4-2** Vergleich der mittleren jährlichen Verdunstung der Ausgangssituation, des Ist-Zustandes und einer hypothetischen verdunstungsorientierten Gestaltung

Landnutzung	Mittlere jährliche Verdunstung	Ausgangssituation		Nach der Bebauung			
				Ist-Zustand		Hypothetische verdunstungsorientierte Gestaltung	
		Fläche	Verdunstung	Fläche	Verdunstung	Fläche	Verdunstung
	[mm/a]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> /a]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> /a]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> /a]
Dächer, unbegrünt	137			45.065	6.174	4.507	617
BK1 Asphalt	137			30.560	4.187	30.560	4.187
BK2 Betonpflaster	137			7.900	1.082	7.900	1.082
BK3 Granitpflaster	210			145	30	145	30
BK4 unbefestigt, Betongitterstein	251	2.170	545	3.315	832	3.315	832
Sträucher	573			1.191	682	1.191	682
Rasen	512			46.705	23.913	38.469	19.696
Bäume	761			2.779	2.115	2.779	2.115
Gründach ext. 0,1 m	305					37.744	11.512
Gründach ext. 0,2 m	354					2.815	997
Versickerungsmulde	545			2.565	1.398	9.801	5.342
Ackerland	534	61.590	32.889				
Wiesen und Weiden	519	56.160	29.147				
Nadelwald	638	20.480	13.066				
Wasserflächen	780			175	137	175	137
Wasserflächen mit Wasserpflanzen	877					1.000	877
Summe		140.400	75.647	140.400	40.550	140.400	48.106
Erhöhung der Verdunstung durch Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen (AE-Maßnahmen)				18.800			
Summe mit Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen				59.350		66.906	
Prozent der Ausgangssituation			100%	ohne AE-Maßn.	54%	64%	
				mit AE-Maßn.	78%	88%	
Prozent des Jahresniederschlags von 787 mm			68%	ohne AE-Maßn.	37%	44%	
				mit AE-Maßn.	54%	61%	

Die Verdunstung entzieht pro m<sup>3</sup> verdunstendes Wasser der Umgebung eine Energiemenge von 2 500 MJ. Daraus ergibt sich für die Energiebilanz des Untersuchungsgebietes, dass durch die verringerte Verdunstung eine Energiemenge von 88 600 GJ/a nicht als Verdunstungswärmestrom abtransportiert wird. Zudem steht im Vergleich zur Ausgangssituation zusätzliche Wärmeenergie in Höhe von 17 700 GJ/a aus der niedrigeren Albedo zur Verfügung, so dass sich der fühlbare Wärmestrom um 106 300 GJ/a erhöht. Mit einem Umrechnungsfaktor von 0,0273 MJ/m<sup>3</sup> Erdgas entspricht das dem Heizwert von 2 900 000 m<sup>3</sup> Erdgas. Diese Menge ist gleich dem durchschnittlichen Jahresenergieverbrauch für Heizung und Warmwasseraufbereitung von 1 160 Haushalten (Durchschnittsverbrauch 2005: 2 500 m<sup>3</sup>/a).

Die Wasser- und Energiebilanzen des Industrie- und Gewerbegebietes „Goldene Höhe“ Teilgebiet 4 in Treuen für die Ausgangssituation, den Ist-Zustand und das hypothetische

verdunstungsorientierte Szenario sind Bild 4-6 und Bild 4-7 aufgeführt.

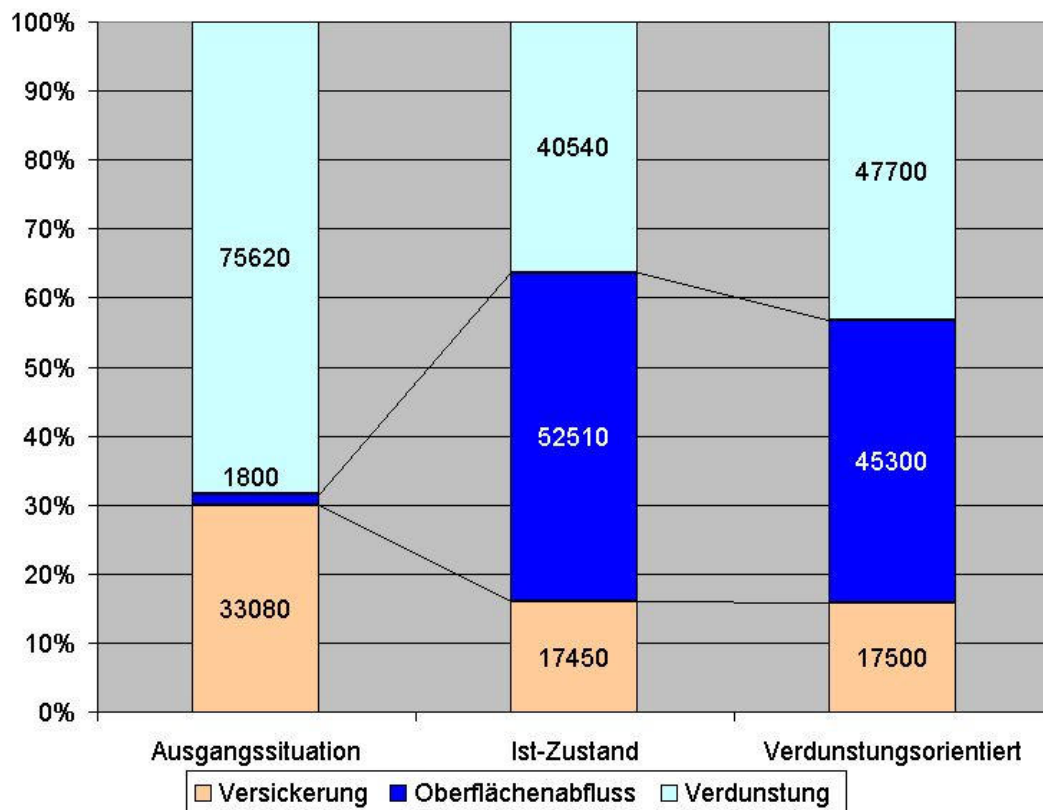


Bild 4-6

Wasserbilanzen der Ausgangssituation, des Ist-Zustandes und einer hypothetischen verdunstungsorientierten Gestaltung [m³/a]

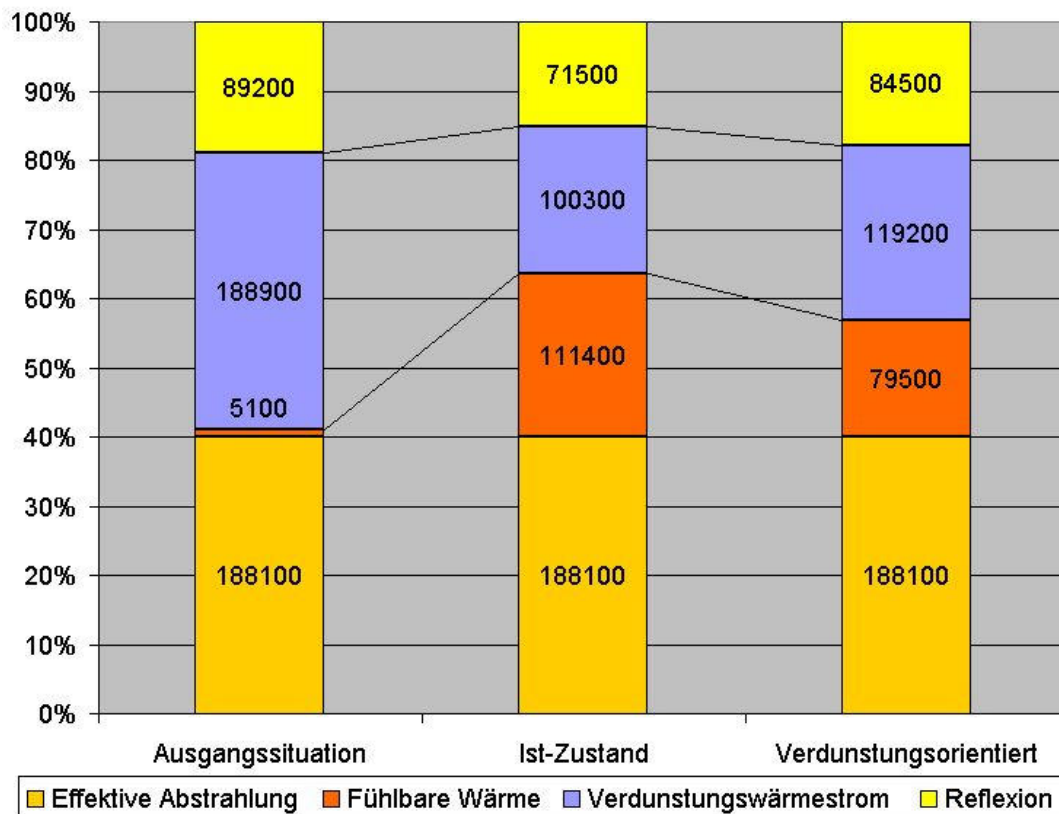


Bild 4-7

Energiebilanzen der Ausgangssituation, des Ist-Zustandes und einer hypothetischen verdunstungsorientierten Gestaltung [GJ/a]

**Wirkungen der Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen auf die Wasser- und Energiebilanz**

Zur Kompensation für den Eingriff in den Naturhaushalt infolge der Erschließung des Gebietes wurden Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen auf einer Fläche von 28,5 ha festgelegt und bereits überwiegend ausgeführt. Von diesen Flächen befinden sich 9,0 ha im Baugebiet selbst und 19,5 ha außerhalb des Bebauungsgebietes.

Änderungen der Landnutzungsart wurden auf 15,95 ha vorgenommen. Diese betrafen hauptsächlich die Umwandlung von intensiv genutztem Ackerland und Dauerwiesen in Laubwald und Wald-Strauch-Übergangsstadien sowie die Anlage von Streuobstwiesen. Die Ausgleichsmaßnahmen können die gravierenden Verschiebungen der Verhältnisse zwischen den Komponenten des Wasser- und Energiekreislaufs durch die Bebauung nicht ausgleichen, da die Gebiete mit Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen bereits vorher überwiegend bewachsene Flächen mit hoher Verdunstung und hohem latenten Wärmestrom waren. Die erhöhte Verdunstung der Ersatzmaßnahmen erfolgt durch eine geringere Versickerung auf diesen Flächen und nicht aus dem gravierend erhöhten Oberflächenabfluss infolge der Versiegelung im Baugebiet.

Die Ausgleichs- und Ersatzflächen wirken sich hauptsächlich auf die Fauna, das Landschaftsbild und das Selbstreinigungsvermögen der Gewässer aus. Positive Auswirkungen ergeben sich außerdem für den Artenschutz und die Artenvielfalt sowie die Wasserqualität der Gewässer.

Die Analyse der Wirkungen der Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen zeigt, dass die konventionelle Auslegung der Eingriffsregelung nur rechnerisch einen Ausgleich bringt. Die tatsächlichen Auswirkungen der Bebauung auf den Wasser- und Energiehaushalt am Standort des Industrie- und Gewerbegebietes können jedoch nicht „ausgeglichen“ werden.

**4.1.5 Vorschläge für die weitere Bebauung**

Die Erschließung der restlichen 17,2 ha des Teilgebietes 4 wurde noch nicht begonnen. Ausgehend von den Auswirkungen der Landnutzungsänderungen im bisher bebauten Bereich sollte auf eine verstärkte dezentrale Rückhaltung und Zwischenspeicherung des Niederschlagswassers orientiert werden. Die Festlegungen zur Bepflanzung im Bebauungsplan sind umfangreich und haben eine positive Wirkung auf die Verdunstung. Im Vergleich zu den bisher überwiegend vorhandenen Ackerflächen ist die Verdunstung der neuen Bepflanzung jedoch nur wenig höher, so dass damit kein spürbarer Ausgleich für die in großem Umfang durch Dächer und Straßen reduzierte Verdunstung möglich ist. Entsprechend der geplanten Nutzung als Industriegebiet überwiegen vollständig versiegelte Dach- und Straßenflächen. Daraus ergeben sich als Vorschläge für eine Erhöhung des Verdunstungsanteils:

1. Dachbegrünung mit extensivem Gründachaufbau bis 10 cm Stärke

Die Begrünung der Flachdächer wird bereits im Grünordnungsplan angeregt, aber bei



keinem Dach angewandt. Aufgrund fehlender verbindlicher Festsetzungen wurde möglicherweise bei der bisherigen Erschließung die übliche konventionelle Dachbefestigung gewählt, ohne das Kosten-Nutzen-Verhältnis extensiver Dachbegrünungen zu untersuchen.

Die mittlere jährliche Verdunstung extensiver Gründächer mit 5 bis 10 cm Aufbaustärke liegt mit 305 mm/a um 168 mm über der von konventionellen Dächern (137 mm/a). Bei einem Anteil der Dachfläche von etwa einem Drittel der Gesamtfläche liegt hier der Schlüssel zur Vermeidung der Versiegelung und Reduzierung der Verdunstung.

## 2. Zwischenspeicherung des Wassers in offenen Wasserflächen und zeitweise mit Wasser gefüllten Mulden

Im Grünordnungsplan ist ein Mindestgrünflächenanteil von 20 % festgelegt. Neben den geforderten Bäumen wurden dadurch umfangreiche Rasenflächen angelegt. Im ersten Bauabschnitt erreichen diese einen Anteil von 33 %. Damit stehen ausreichend Flächen zur Verfügung, um den Oberflächenabfluss von Dächern und Straßen in flachen Teichen, die als Verdunstungsbecken wirken, und Versickerungsmulden zwischenzuspeichern. Die Festlegungen im Bebauungsplan zur Anlage zusammenhängender Grünflächen bieten zudem gute Möglichkeiten für die Ableitung des Wassers in offenen Gräben und Mulden. Als günstig erweist sich weiterhin, dass aufgrund der großflächigen Hallengebäude die Grundstücke im Zuge der Erschließung mit nur geringem Gefälle angelegt werden. Die Wasserflächen sind dabei den Versickerungsmulden vorzuschalten. Sie wirken einerseits als zusätzlicher Speicher und andererseits wird durch die Sedimentation von Schwebstoffen die Lebensdauer der Versickerungsmulden und Rigolen erhöht.

Eine Wiederherstellung des ursprünglichen Verdunstungsanteils ist auch bei der konsequenten Umsetzung dieser Vorschläge nicht möglich. Dazu ist der Straßenflächenanteil zu hoch. Der Oberflächenabfluss kann jedoch soweit reduziert werden, dass nur noch bei extremen Starkregenereignissen ein Abfluss aus dem Gebiet auftritt.

## 4.2 Auswirkungen des City-Tunnel-Projekts in Malmö auf den Wasser- und Energiehaushalt

In der südschwedischen Stadt Malmö wird zurzeit das City-Tunnel-Projekt realisiert. Der Abschluss der 2005 begonnen Bauarbeiten ist für 2011 geplant. In einem Gemeinschaftsvorhaben der schwedischen Staatsbahn, der Stadt Malmö und der Region Skåne soll zur Verbesserung des innerstädtischen öffentlichen Personennahverkehrs die bisher in einem weiten Bogen um die Stadt führende Schienenverbindung durch dicht besiedelte Gebiete von Malmö geführt werden. Die Neubaustrecke ist eine Folgemaßnahme der Öresundbrücke und dient der Umsetzung der mit der Brückenverbindung geschaffenen Möglichkeiten zur Entwicklung der Region. Vorgesehen ist der Neubau von insgesamt 17 km Eisenbahntrasse, davon verlaufen in der Innenstadt 6 km als Tunnel. Von den geplanten zwei neuen Bahnhöfen befindet sich die Station Hyllie im oberirdischen und die Station Triangeln im unterirdischen Abschnitt der Trasse (Bild 4-8).

Das City-Tunnel-Projekt bringt erhebliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Stadt mit sich. Auf einer Länge von etwa 3 km verläuft die Trasse in einem Geländeeinschnitt und erfordert dort eine dauerhafte Grundwasserabsenkung. Für den Bau der unterirdischen Stationen am Hauptbahnhof und im Stadtteil Triangeln sind großflächige temporäre Grundwasserabsenkungen über einen Zeitraum von mindestens 6 Jahren erforderlich. An der Station Triangeln ist eine Neugestaltung des angrenzenden oberirdischen Bereichs vorgesehen, die eine erhebliche Zunahme der Versiegelung mit sich bringt.

Die Untersuchungen beschränken sich auf das Teilobjekt des Neubaus der Untergrundstation Triangeln und dessen Auswirkungen auf den Wasser- und Energiehaushalt. Dabei werden zum einen die Folgen der temporären Grundwasserabsenkung während der 6-jährigen Bauzeit und zum anderen die langfristigen Auswirkungen infolge der Neubebauung des Gebietes betrachtet.

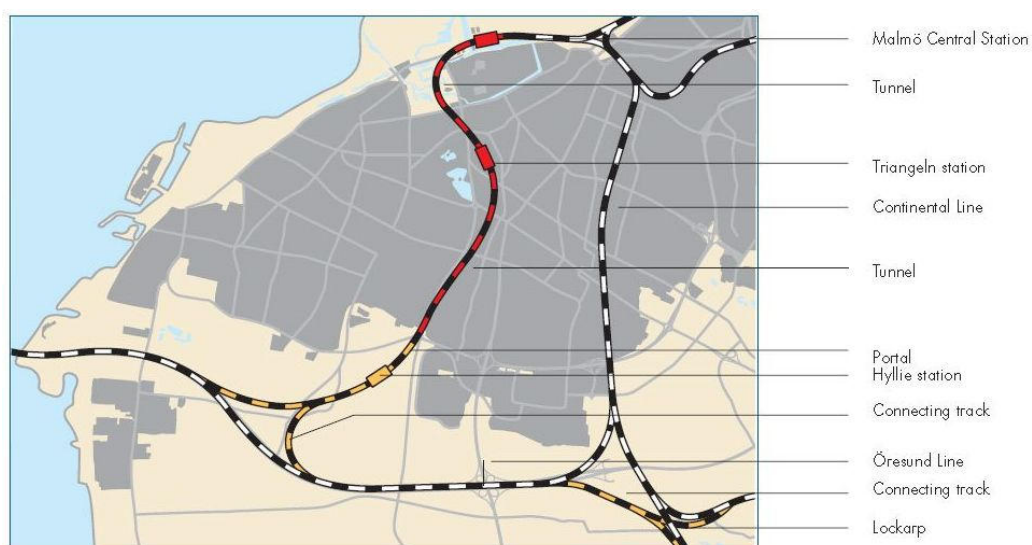


Bild 4-8

Übersichtslageplan City-Tunnel-Projekt Malmö  
[Malmö Citytunnel Group 2005]

Die Untersuchungen vor Ort und die Materialsammlung erfolgten im Juni 2006 während einer von der Europäischen Union im Rahmen der COST C15 Action [COST 2008] ermöglichten einwöchigen Forschungsreise nach Malmö.

## 4.2.1 Ausgangssituation

### Geografische Situation

Die Stadt Malmö liegt in Südschweden am Öresund. Am gegenüberliegenden Ufer befindet sich die dänische Hauptstadt Kopenhagen. Eine direkte Zug- und Straßenverbindung dorthin besteht seit der Eröffnung der Öresundbrücke im Jahr 2000.

Die geplante Untergrundstation wird im Zentrum von Malmö etwa 200 m südlich des Triangeln-Platzes gebaut. Der Abstand zur Küste beträgt 2,5 km. Das Gelände liegt 6,5 bis 7,5 m über dem Meeresspiegel und ist weitgehend eben. Die mittlere Geländeneigung ist kleiner als 0,5 %.

### Bestehende Landnutzung

Der Standort des nördlichen Zugangs der Untergrundstation befindet sich auf einer Grünfläche vor der St. Johannes Kirche (Bild 4-9). Die oberirdischen Anlagen des südlichen Ein- und Ausgangs werden auf dem unbefestigten Sport- und Parkplatz einer Schule gebaut. Zwischen den Zugängen befindet sich mehrere Gebäude eines Schulkomplexes mit den zugehörigen Wegen, Stellplätzen und Grünanlagen. Das Untersuchungsgebiet wird von vier Wohngebietsstraßen begrenzt. Die Umgebung ist mit Wohn- und Geschäftshäusern dicht bebaut. In unmittelbarer Nähe befinden sich Operntheater, Konzerthalle, Kunstaussstellung, Universitätskrankenhaus, Sportstadion und Sportplätze, Einkaufszentren sowie die großflächige innerstädtische Parkanlage „Pildammsparken“.



Bild 4-9

Luftbild des Untersuchungsgebietes (gelb umrandet) mit geplantem Verlauf des City-Tunnels und der Lage der Baugruben für den Süd- und Nordeingang der Station Triangeln (Quelle Luftbild: [www.hitta.se](http://www.hitta.se))

Die Stadt Malmö ist in Schweden bekannt für ihre vielen Bäume und Parkanlagen. Diese sind ein Wahrzeichen der Stadt und werden mit hohem Aufwand gepflegt und unterhalten.

### Klimadaten

Südschweden gehört zur gemäßigten und feuchten Westwindzone Mitteleuropas. Das Lokalklima wird durch die Lage unmittelbar an der Meeresverbindung zwischen Nord- und Ostsee bestimmt.

Die Berechnungen werden mit langjährigen Mittelwerten des Zeitraums 1961 - 1990 durchgeführt. Die erforderlichen Klimadaten wurden vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut in Norrköping (SHMI) zur Verfügung gestellt. Eine Zusammenstellung der angewandten Daten enthält Tabelle 4-3.

Tabelle 4-3 Mittlere langjährige Klimadaten der Zeitreihe 1961 - 1990 für Malmö

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lufttemperatur, $T$ [°C]	-0,7	-0,9	1,4	6,3	11,1	14,9	17,3	16,8	13,5	8,7	4,8	1,9
Luftfeuchtigkeit, $U$ [%]	86	85	81	74	68	68	73	76	79	82	86	88
Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe, $v_{2m}$ [m/s]	2,8	2,6	2,8	2,6	2,3	2,1	2,2	2,2	2,6	2,4	3,0	2,9
Tägliche Sonnenscheindauer, $S$ [h/d]	1,3	2,4	4,0	5,9	8,7	8,8	8,2	6,9	5,7	2,7	1,2	0,6
Astronomisch mögliche Sonnenscheindauer, $S_0$ [h/d]	7,7	9,6	11,9	14,1	16,3	17,5	16,9	15,0	12,7	10,5	8,3	7,2
Extraterrestrische Strahlung, $R_0$ [W/m²]	73	135	234	345	435	478	457	381	276	170	90	56
Korrigierter Niederschlag, $P_{korr}$ [mm]	55,4	40,7	33,9	37,3	42,9	52,0	73,5	70,1	59,9	59,9	49,7	49,7

Die Angaben zur Lufttemperatur, relativen Luftfeuchtigkeit, tatsächlichen Sonnenscheindauer und zum Niederschlag sind von der Wetterstation des ehemaligen Flugplatzes von Malmö.

Die Monatsmittel der Windgeschwindigkeit stammen von der Stadt Helsingborg. Diese liegt 50 km nordwestlich von Malmö und befindet sich ebenfalls an der Küste des Öresunds. In der unmittelbaren Nähe von Malmö sind Windmessungen nur von Leuchttürmen direkt im Meer oder von Stationen im Hinterland verfügbar. Deren Windverhältnisse weichen jedoch stark von den Verhältnissen an der Küste ab.

Die Berechnungen werden mit folgenden Klimadaten ausgeführt:

- Mittlerer Jahresniederschlag  $P_{korr}$  625 mm
- Niederschlag im Sommerhalbjahr  $P_{korr, SHJ}$  358 mm
- Gras-Referenzverdunstung  $ET_0$  500 mm
- Mittlere Lufttemperatur  $T$  7,9 °C
- Mittlere tatsächliche Sonnenscheindauer  $S$  1 718 h/a

### **Geologische und hydrologische Situation**

Die Region Skåne ist in geologischer Hinsicht die Fortsetzung der Tiefebene Norddeutschlands und Dänemarks. Im Norden schließt sich das Südschwedische Hochland an. Der Festgesteinsuntergrund besteht aus Kalkstein. Dieser wird überlagert von eiszeitlichen Lockergesteinsschichten aus Sand, Lehm und Geschiebemergel.

In der Vorbereitungsphase des Tunnelbaus wurden umfangreiche geotechnische Untersuchungen durchgeführt. Allein im Untersuchungsgebiet wurden 65 Baugrundsondierungen vorgenommen. Demnach steht der Kalkstein im Bereich der geplanten Station Triangeln in einer Tiefe von 4 bis 7 m an. Anthropogene Ablagerungen und Sand reichen in 1,5 bis 2 m Tiefe.

Die hydrologischen Verhältnisse werden durch die Nähe zum Meer bestimmt. Der obere Grundwasserleiter läuft in Richtung Meer aus. Der Grundwasserspiegel befindet sich in einer Tiefe von 2 bis 3 m. Als Grundwasserstauer wirkt eine Sedimentschicht über dem Kalkstein. Ein weiterer Grundwasserleiter befindet sich in etwa 10 m Tiefe.

#### **4.2.2 Temporäre Auswirkungen auf die Verdunstung während der Bauzeit**

Die Auswirkungen der Landnutzungsänderungen in Verbindung mit dem Neubau der Station Triangeln werden zum einen für die 6-jährige Bauzeit und zum anderen für die Zeit nach der Fertigstellung untersucht.

Als Untersuchungsgebiet wurde die von der Grundwasserabsenkung am stärksten betroffene Zone gewählt. Die Absenkung beträgt hier zwischen 6 und 12 m gegenüber dem vorherigen Grundwasserspiegel. Das Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von 46 800 m<sup>2</sup>.

Für dieses Gebiet wurden alle Oberflächen entsprechend dem in Kapitel 3.1 erstellten Landnutzungsartenkatalog erfasst. Die Landnutzungsdaten konnten aus dem MapInfo GIS der Stadt Malmö und aus Luftbildern entnommen werden. Die Angaben zur Landnutzung nach der Fertigstellung der Station stammen aus Entwürfen der Stadt Malmö für die Neugestaltung.

Die Wasserbilanzen wurden mit den drei Hauptkomponenten Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss erstellt. Dazu wurden auf der Basis der langjährigen Klimadaten mit dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren für die verschiedenen Oberflächen die mittleren jährlichen Anteile der Verdunstung berechnet und die verbleibende Niederschlagsmenge auf die Komponenten Versickerung und Oberflächenabfluss aufgeteilt. Für die Energiebilanzen wurde die verfügbare Energie anhand der Klimadaten und der Albedo der Oberflächen ermittelt. Diese kann ausgehend von der für die Verdunstung benötigten Energiemenge auf den Verdunstungswärmestrom und die fühlbare Wärmeenergie aufgeteilt werden.



Der Bau der Untergrundstation Triangeln erfordert eine großräumige Grundwasserabsenkung im Zeitraum von 2005 bis 2011. Das Grundwasser wird auf 65 ha um mindestens 1 m abgesenkt. In der am meisten betroffenen Zone unmittelbar um die Baustelle beträgt die Grundwasserabsenkung mehr als 12 m (Bild 4-10).

Die Absenkung um mehr als 1 m beeinflusst gemäß Baumkataster 1 421 Bäume. Nicht alle dieser Bäume müssen geschützt werden. Bäume, die jünger als 25 Jahre sind, können sich an die zeitweilige Grundwasserabsenkung und den späteren Wiederanstieg anpassen. Bereits geschädigte Bäume, die ohnehin ersetzt werden sollen, werden ebenfalls nicht gesondert behandelt. Dazu gehören vor allem Ulmen, die in der Stadt Malmö in großem Umfang von der weltweit auftretenden Holländischen Ulmenkrankheit betroffen sind. Die Anzahl der als besonders wertvoll und schützenswert eingestuften Bäume beträgt damit 327. Davon befinden sich etwa 200 in der am stärksten von der Grundwasserabsenkung betroffenen Zone.

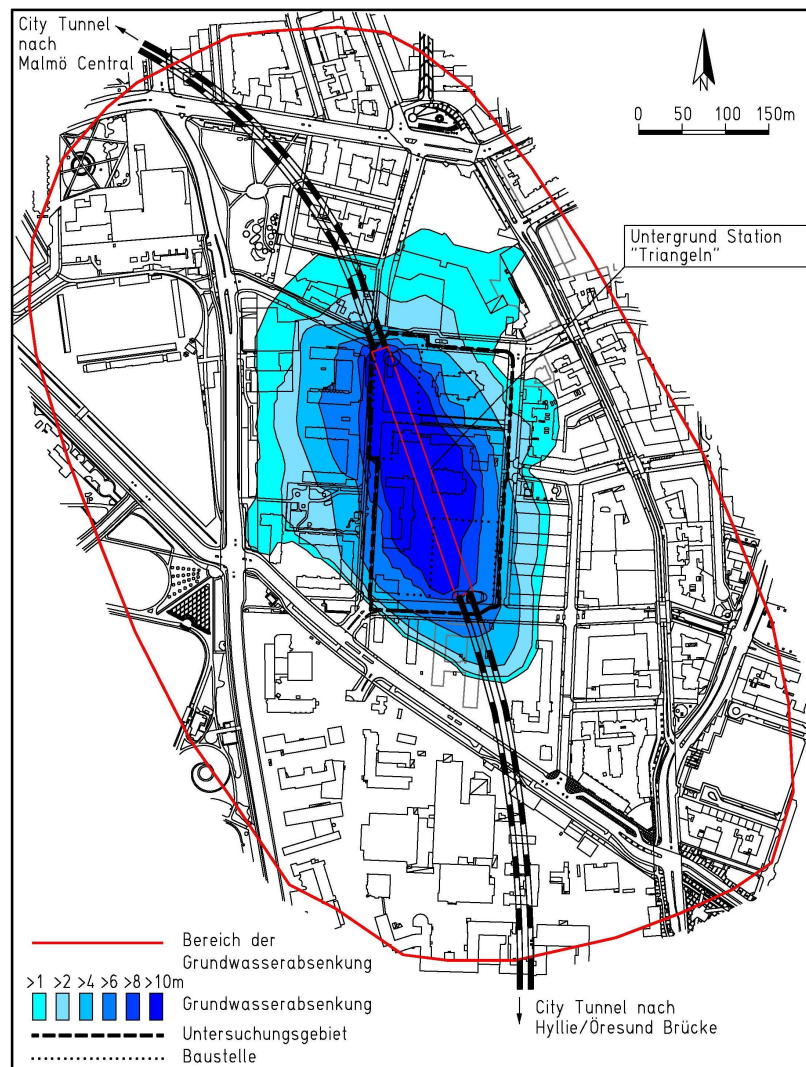


Bild 4-10 Einflussbereich der Grundwasserabsenkung während des Baus der Station Triangeln

Zur Kontrolle des Zustandes der betroffenen Bäume wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm gestartet. An vier Bäumen sind automatische Messstationen angebracht, die im Abstand von 30 Minuten die Verdunstungsleistung der Bäume und die Änderung der

Bodenfeuchtigkeit messen. Zudem wird an 25 Punkten im Bereich der Grundwasserabsenkung die Bodenfeuchtigkeit bis in 1,2 m Tiefe manuell gemessen. Dies erfolgt im Sommer wöchentlich und im Winter monatlich. Das Baumuntersuchungsprogramm wird von der Universität Helsinki betreut [Nikinmaa 2006]. Mit den Angaben aus dem Messprogramm wird festgelegt, zu welchem Zeitpunkt und in welchem Umfang die Bäume bewässert werden.

Mit der Bewässerung soll verhindert werden, dass die Bäume in der Phase der Grundwasserabsenkung Wurzeln ausbilden, die dem nach unten absinkenden Wasser folgen. Diese würden beim Wiederanstieg des Grundwassers nach der Fertigstellung der Station in den dann wieder mit Wasser gesättigten Schichten verfaulen und zu schweren Schäden bis hin zum Absterben der Bäume führen.

Die Anlage der beiden Baugruben ist mit einer Versiegelung bisher durchlässiger und teilweise durchlässiger Flächen verbunden. Der Baustellenbereich für den Nordeingang mit einer Fläche von 6 500 m<sup>2</sup> wurde auf einer teilweise mit Bäumen und Sträuchern bewachsenen und mit asphaltierten Wegen durchzogenen Rasenfläche angelegt. Die Baustelle für den Südeingang - Fläche 9 100 m<sup>2</sup> - befindet sich auf einem bisher als Sport- und Parkplatz genutztem und von Bäumen umgebenen Sandplatz. Die Versiegelung umfasst 2 730 m<sup>2</sup> Rasenfläche, 2 100 m<sup>2</sup> mit Bäumen und Sträuchern bewachsene Flächen und 6 420 m<sup>2</sup> Sandplatz.

Die Auswirkungen auf den Wasser- und Energiehaushalt für die Phase der Bauarbeiten werden für zwei verschiedene Szenarien untersucht:

- Szenario 1 „optimistisch“ - geht davon aus, dass sich aufgrund des Baumuntersuchungsprogramms und der gezielten Bewässerung die Transpiration der von der Grundwasserabsenkung betroffenen Bäume nur gering ändert.
- Szenario 2 „pessimistisch“ - zeigt die Auswirkungen, die entstehen könnten, wenn keine Maßnahmen zum Schutz der Bäume unternommen werden.

Beide Szenarien basieren auf der Landnutzung, die gegenwärtig nach der vollständigen Einrichtung der beiden Baustellenflächen am Nord- und Südeingang der geplanten Station besteht. Diese wird mit der Ausgangssituation verglichen.

Im optimistischen Szenario 1 wird eine Reduzierung der Transpiration der Bäume um 10 % gegenüber der Ausgangssituation angenommen. Die Interzeption bleibt unverändert. Der Wert für die Abnahme der Transpiration ist eine Schätzung, der die Überlegung zugrunde liegt, dass die Bewässerung mit Pausen erfolgt, während die Wasserentnahme durch die Bäume vor der Grundwasserabsenkung kontinuierlich erfolgen konnte. In den Zeiträumen zwischen der Bewässerung wird die Transpiration der Bäume eingeschränkt. Genauere Angaben dazu sollten aus dem im Oktober 2005 begonnenen Monitoringprogramm an den

Bäumen in Malmö gewonnen werden. Durch wiederholte mehrwöchige Datenverluste infolge von Schwierigkeiten mit der automatischen Datenübertragung konnten aus den bisher vorliegenden lückenhaften Messdaten jedoch keine verwendbaren Ergebnisse zum Umfang der Reduzierung der Verdunstung gewonnen werden.

Die Reduzierung der Transpiration wird nur für Bäume angenommen. Für Sträucher und Wiesenflächen bleibt sie unverändert, da diese aufgrund der niedrigeren Durchwurzelungstiefe kaum vom kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser profitieren können.

Beim pessimistischen Szenario 2 - ohne Bewässerungsmaßnahmen zum Schutz gefährdeter Bäume - wird eine Reduzierung der Transpiration um 50 % angenommen. Dieser Wert ist gleichfalls eine Schätzung. Er berücksichtigt die Verringerung der Transpiration durch fehlendes Grundwasser und durch die Reduzierung der Blattmasse und das teilweise Absterben von Zweigen.

Die Veränderungen der Flächennutzung des Untersuchungsgebietes und die daraus resultierenden Änderungen der mittleren jährlichen Verdunstung sind in Tabelle 4-4 dargestellt. Differenzen zwischen den Szenarien 1 und 2 ergeben sich nur durch die unterschiedliche Transpiration der Bäume. Alle anderen Landnutzungsarten bleiben unverändert. Die Abweichungen zwischen den Szenarien sind dadurch gegenüber den Veränderungen zur Ausgangssituation vergleichsweise gering.

**Tabelle 4-4** Änderungen der mittleren jährlichen Verdunstung infolge der Landnutzungsänderung für die Szenarien 1 und 2 im Vergleich zur Ausgangssituation

Landnutzung	mittlere jährliche Verdunstung [mm/a]	Ausgangssituation		Bauzeit 2005 - 2011		
		Fläche [m <sup>2</sup> ]	Verdunstung [m <sup>3</sup> /a]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Szenario 1	Szenario 2
					Verdunstung [m <sup>3</sup> /a]	Verdunstung [m <sup>3</sup> /a]
Dächer	125	6.372	797	6.972	872	872
BK 1 (Asphalt / Beton)	125	15.199	1.900	25.857	3.232	3.232
BK 2 (Sandplatz)	125	9.617	1.202	3.198	400	400
BK 3 (Pflaster / Platten)	191	1.621	310	1.621	310	310
Sträucher	460	1.056	486	884	407	407
Rasen	370	6.420	2.375	3.805	1.408	1.408
Laubbäume Ausgangssituation	603	6.515	3.929			
Laubbäume Szenario 1	543			4.463	2.423	
Laubbäume Szenario 2	301					1.343
Summe		46.800	10.998	46.800	9.051	7.971
Prozent der Ausgangssituation			100%		82%	73%
Prozent des jährlichen Niederschlags (625 mm/a)			38%		31%	27%

Die Verdunstung des Gebietes wird im Szenario 1 im Jahresmittel um etwa 18 % reduziert. Das entspricht einer Wassermenge von 1 950 m<sup>3</sup>, die im Laufe eines Jahres infolge der Versiegelung zusätzlich abfließt. Der Verdunstungsanteil der Bäume bleibt dank der künstlichen



Bewässerung trotz der Reduzierung des Flächenanteils durch Rodungen für die Baustellen mit 27 % gegenüber 36 % in der Ausgangssituation relativ hoch.

Im Szenario 2 wird die Transpiration der Bäume nochmals um jährlich etwa 1 080 m<sup>3</sup> verringert. Zu beachten sind dabei auch die hier nicht erfassten langfristigen Auswirkungen infolge der mehrjährigen unzureichenden Wasserversorgung. Eine große Anzahl Bäume würde diese Phase nicht überleben. Bei anderen wäre mit ernsthaften Schäden zu rechnen, von denen sie sich gar nicht oder erst im Laufe vieler Jahre erholen würden. Die Verdunstung dieser Bäume wäre langfristig deutlich reduziert. Zudem dauert es viele Jahre, bis neu gepflanzte Bäume die Verdunstungsleistung der betroffenen Bäume wieder erreichen.

#### **4.2.3 Dauerhafte Auswirkungen nach der Fertigstellung der Station Triangeln**

Die gegenwärtig für die Baustellen in Anspruch genommenen Flächen von 15 600 m<sup>2</sup> werden nach der Fertigstellung der Station Triangeln neu gestaltet. Für den Zugang zum unterirdischen Bahnhof werden eine Nord- und eine Südeingangshalle in der Form von Glaskuppeln gebaut. Das prognostizierte Aufkommen von täglich 37 000 Passagieren erfordert zudem großflächige Fußgängerbereiche, Parkplätze für Fahrräder und Autos sowie Bushaltestellen. Anstelle des unbefestigten Sport- und Parkplatzes ist der Bau eines Hochhauskomplexes vorgesehen. Mit diesen Baumaßnahmen ist eine erhebliche Zunahme der Versiegelung verbunden. Allerdings befinden sich die Planungen der Außenanlagen um die Station Triangeln noch in einem sehr frühen Stadium, da die Inbetriebnahme der Strecke erst 2011 erfolgen wird.

Die dauerhaften Auswirkungen der Landnutzungsänderungen werden ebenfalls für zwei Szenarien untersucht:

- Szenario 3 „konventionell“ - geht von einer Ausbildung der neuen Dachflächen und versiegelten Wege und Plätze analog zu den gegenwärtig in der unmittelbaren Umgebung vorhandenen Flächen und Gebäuden aus.
- Szenario 4 „verdunstungsorientiert“ - nimmt an, dass ein großer Teil der neuen Dachflächen begrünt wird und bei der Oberflächenentwässerung der neu zu befestigenden Wege und Plätze eine möglichst hohe Versickerung und Verdunstung angestrebt wird.

Die Landnutzungsänderungen der Szenarien 3 und 4 betreffen nur die geplante Neugestaltung der Bereiche um den Nord- und Südeingang der Untergrundstation. Mögliche Veränderungen der dazwischen liegenden Grundstücke sind nicht berücksichtigt.

Im Szenario 3 „konventionell“ wird angenommen, dass alle neuen Dächer entsprechend der bisherigen Bauweise mit Bitumen, Metall oder Dachsteinen gedeckt werden. Bei den neuen Wegen und Plätzen wird von einer Befestigung überwiegend mit Pflaster und dem Anschluss der Oberflächenentwässerung an die vorhandene Kanalisation ausgegangen.

Das Szenario 4 basiert auf einer konsequenten Anwendung der Methoden der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung mit besonderer Berücksichtigung der Verdunstung. Die wirksamsten Elemente sind dabei Wasserflächen, Dachbegrünungen und Bäume.

Dachbegrünungen durch extensive Gründächer mit Aufbauhöhen bis 10 cm bringen keine oder nur geringe zusätzliche Lasten für das Gebäude und sind damit für alle Flachdächer geeignet. Da die Gebäude neu projektiert und gebaut werden, ist auch die Anlage extensiver Gründächer mit Aufbauhöhen bis 20 cm und intensiver Gründächer mit höheren zusätzlichen Lasten möglich. Im Szenario 4 wird von einer Begrünung auf der Hälfte der neuen Dachflächen ausgegangen. Davon werden 50 % als extensive Dachbegrünung mit 10 cm Aufbau, 25 % extensive Dachbegrünung mit 20 cm Aufbau und 25 % intensive Dachbegrünungen mit einer Aufbaustärke bis 50 cm angenommen.

Der Einsatz durchlässiger Befestigungen für Wege und Plätze ist aufgrund der prognostizierten sehr hohen Passagierzahlen nur begrenzt möglich. Ursache ist die hohe Verdichtung der durchlässigen Flächen bei intensiver Belastung. Zudem kann sich der für die dauerhafte Durchlässigkeit und Reinigungswirkung erforderliche Bewuchs der Fugen nicht ausbilden. Nicht zuletzt ist auch mit einer Gefährdung des Grundwassers durch eine erhöhte Schadstoffbelastung zu rechnen.

Auch im Szenario 4 wird deshalb für die neu zu befestigenden Wege und Plätze von einer Befestigung mit Pflaster und Platten der Belagsklasse 3 (Kantenlängen <8 cm) ausgegangen. Die Entwässerung der befestigten Wege und Plätze sollte vorzugsweise mit offener Wasserführung erfolgen. Bei einer Zwischenspeicherung des Wassers in Mulden oder durch den Aufstau in kleinen Teichen, können hohe Anteile an Versickerung und Verdunstung erreicht werden. In der Berechnung werden 600 m<sup>2</sup> Versickerungsmulden innerhalb von Rasenflächen angenommen. Für den Bereich am Südeingang, mit einer neu zu gestaltenden Fläche von etwa 9 000 m<sup>2</sup>, ist die Anlage eines Teiches mit ständigem Wasserstand und der Möglichkeit des Aufstaus zur Rückhaltung bei Starkniederschlägen möglich. Für die Berechnung wird von einer ständigen Wasserfläche von 250 m<sup>2</sup> ausgegangen.

Generell kann Wasser sehr gut als Gestaltungselement im öffentlichen Raum genutzt werden. In einem Wohngebiet in Malmö Stadtteil Augustenborg besteht bereits eine ähnliche offene Oberflächenentwässerung.

Bäume sind in Städten unverzichtbar. Allerdings gelingt es auch im Szenario 4 aufgrund fehlender Flächen nicht, die 2 100 m<sup>2</sup> mit Bäumen und Sträuchern bewachsene Flächen, die im Zuge der Einrichtung der Baustelle beseitigt worden sind, durch Neupflanzungen mit der gleichen Fläche vollständig zu ersetzen. Die Differenz beträgt 364 m<sup>2</sup>. Um eine möglichst hohe Wirkung für das innerstädtische Klima zu erzielen, wurde der Anteil der Bäume zu Lasten der Sträucher erhöht. Angenommen werden die Neupflanzung und der langfristige Erhalt

von Bäumen auf einer Fläche von 1 500 m<sup>2</sup>. Das entspricht der Kronenfläche von 30 Bäumen mit einem mittleren Kronendurchmesser im voll entwickelten Zustand von 8 m.

Die Veränderungen der Flächennutzung nach der Fertigstellung der Station Triangeln und die daraus resultierenden Änderungen der mittleren jährlichen Verdunstung sind für die Szenarien 3 und 4 im Vergleich zur Ausgangssituation in Tabelle 4-5 aufgeführt.

**Tabelle 4-5** Änderungen der mittleren jährlichen Verdunstung infolge der Landnutzungsänderung für die Szenarien 3 und 4 im Vergleich zur Ausgangssituation

Landnutzung	mittlere jährliche Verdunstung [mm/a]	Ausgangssituation		Nach Fertigstellung			
		Fläche [m <sup>2</sup> ]	Verdunstung [m <sup>3</sup> /a]	Szenario 3		Szenario 4	
				Fläche [m <sup>2</sup> ]	Verdunstung [m <sup>3</sup> /a]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Verdunstung [m <sup>3</sup> /a]
Dächer	125	6.372	797	13.137	1.642	9.937	1.242
BK 1 (Asphalt / Beton)	125	15.199	1.900	10.535	1.317	10.535	1.317
BK 2 (Sandplatz)	125	9.617	1.202	1.357	170	1.357	170
BK 3 (Pflaster / Platten)	191	1.621	310	11.887	2.270	9.537	1.822
Sträucher	460	1.056	486	603	277	603	277
Rasen	370	6.420	2.375	4.177	1.545	4.177	1.545
Laubbäume	603	6.515	3.929	5.104	3.078	6.604	3.982
Gründach extensiv 10 cm	286					1.600	457
Gründach extensiv 20 cm	336					800	269
Gründach intensiv 50 cm	429					800	343
Versickerungsmulde	474					600	284
Wasser	711					250	178
Summe		46.800	10.998	46.800	10.300	46.800	11.886
Prozent der Ausgangssituation			100%		94%		108%
Prozent des jährlichen Niederschlags (625 mm/a)			38%		35%		41%

Das konventionelle Szenario führt zu einer dauerhaften Verringerung der Verdunstung um weitere etwa 700 m<sup>3</sup>/a, verbunden mit einem Anstieg des fühlbaren Wärmestroms. Dagegen kann bei einer verdunstungsorientierten Lösung sogar eine Erhöhung der Verdunstung um 8% gegenüber der Ausgangssituation erreicht werden.

#### 4.2.4 Vergleich der Wasser- und Energiebilanzen der Ausgangssituation und der untersuchten Szenarien

Die Wasser- und Energiebilanzen für verschiedene Szenarien sind nur von der Art der Oberfläche und damit von der Landnutzung abhängig. Die weiteren klimatischen und geologischen Faktoren bleiben gleich. Da die Verdunstung ein an der Oberfläche erfolgender Prozess ist, bestimmt die Art der Oberfläche entscheidend die Wasser- und Energiebilanz eines Gebietes. Die Anteile der Landnutzungsarten für die Ausgangssituation und die Szenarien 1 - 4 des Untersuchungsgebietes Triangeln sind in Bild 4-11 gegenübergestellt. Der Anteil versiegelter Flächen ist aufgrund der Lage in einem dicht besiedelten Gebiet bereits in

der Ausgangssituation hoch.

Die auf der Basis dieser Landnutzungsanteile errechneten Wasserbilanzen für die Ausgangssituation und die Szenarien während der Bauzeit und nach der Fertigstellung sind in Bild 4-12 dargestellt. Bereits die Ausgangssituation ist aufgrund der hohen Versiegelung erheblich gegenüber der Bilanz eines natürlichen Gebietes verändert.

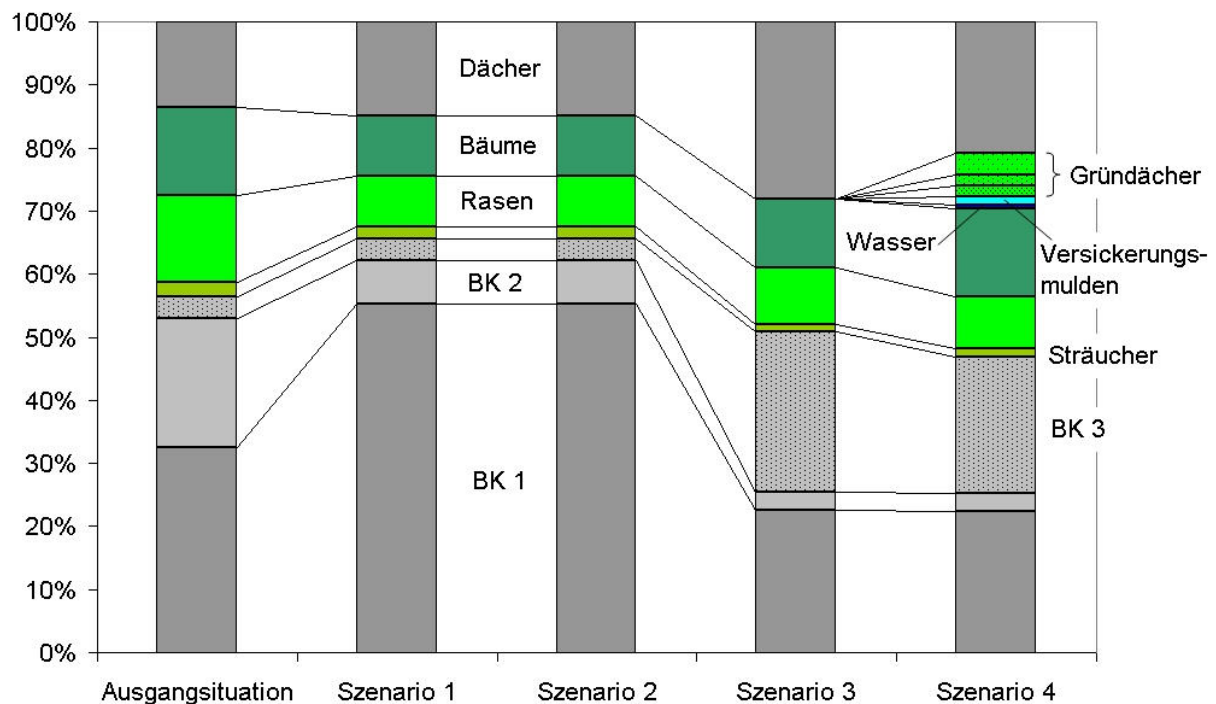


Bild 4-11 Anteile der Landnutzungsarten für die Ausgangssituation und die Szenarien 1 - 4 im Untersuchungsgebiet Triangeln

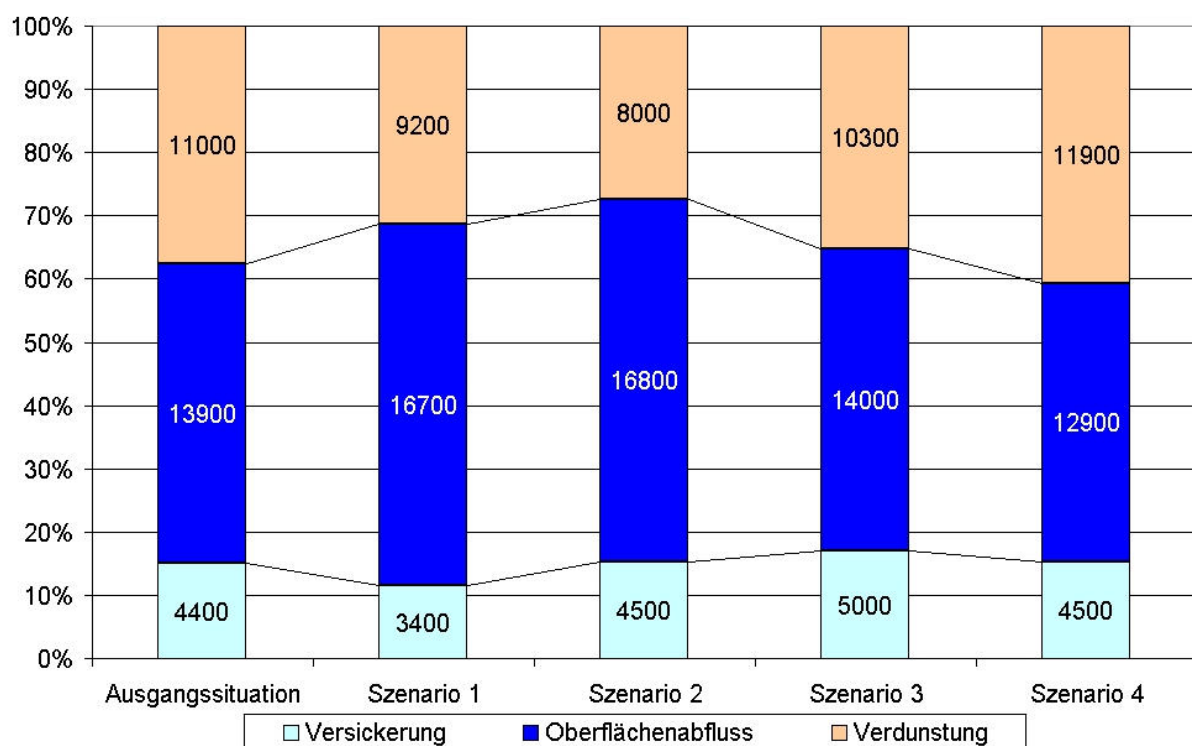


Bild 4-12 Mittlere jährliche Wasserbilanz für die Ausgangssituation und die Szenarien 1 - 4 im Untersuchungsgebiet Triangeln [m³/a]

Der Oberflächenabfluss, der in der Jahresbilanz eines natürlichen Gebietes sehr gering ist, erreicht bereits 47 %. Dieser wird im Szenario 2 während der Bauzeit bis auf einen Anteil von 57 % erhöht. Aufgrund des geringen Verdunstungsanteils in der Ausgangssituation ist im verdunstungsorientierten Szenario 4 sogar eine Verbesserung gegenüber der Ausgangssituation möglich.

In Bild 4-13 sind die Abweichungen der Verdunstung der Teilflächen infolge der Landnutzungsänderungen im Vergleich zur Ausgangssituation für die Szenarien 1 - 4 grafisch dargestellt. Der Ausschnitt 1 zeigt die mittlere jährliche Verdunstungshöhe für die Oberflächen der Ausgangssituation. In den Ausschnitten 2 bis 5 sind die Abweichungen gegenüber diesen Ausgangswerten für die Szenarien 1 bis 4 dargestellt. Die Bereiche zwischen den Baustellen des Nord- und Südzugangs werden während der Bauzeit durch die verringerte Verdunstung der Bäume beeinflusst. Nach der Fertigstellung betreffen die Änderungen nur die geplante Neubebauung und Umgestaltung der Bereiche um die Zugänge zur Station.

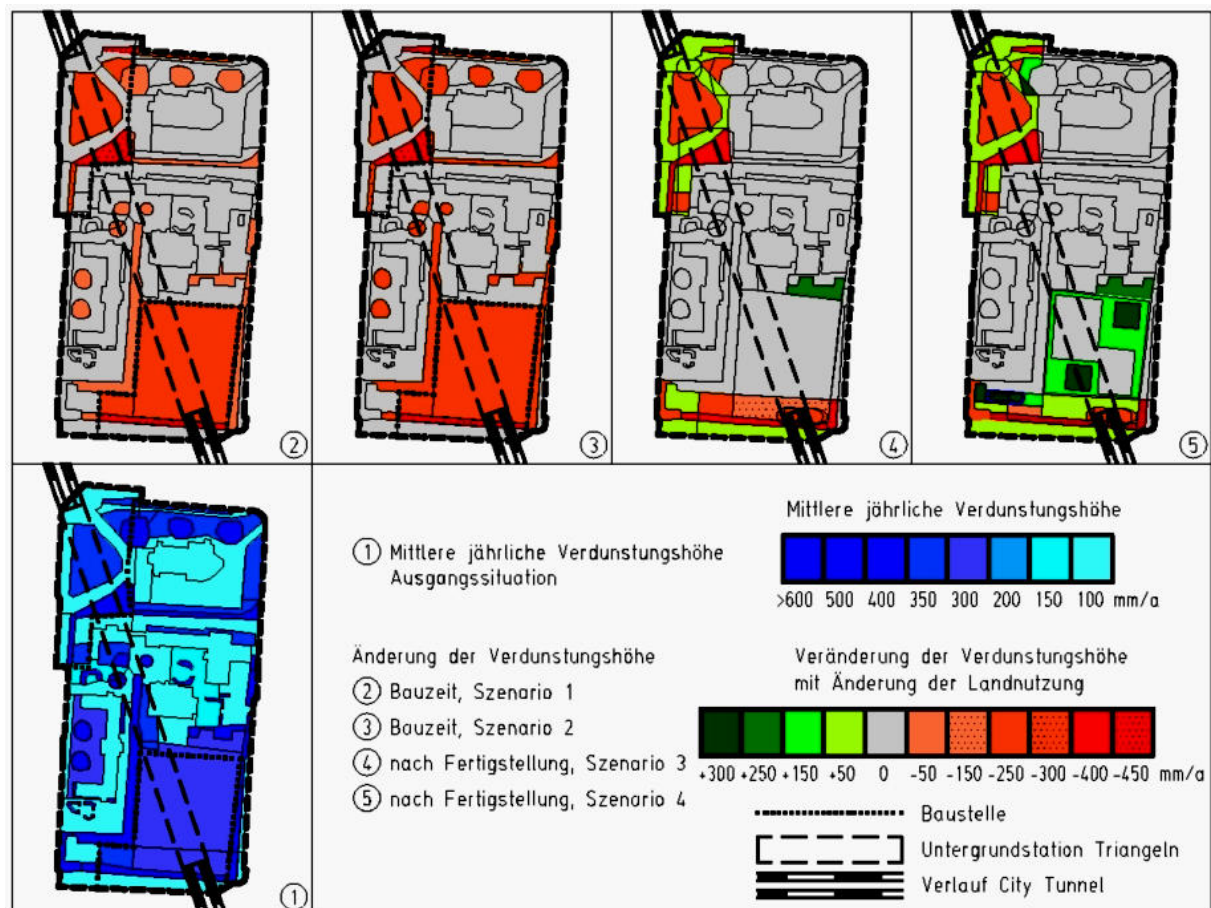
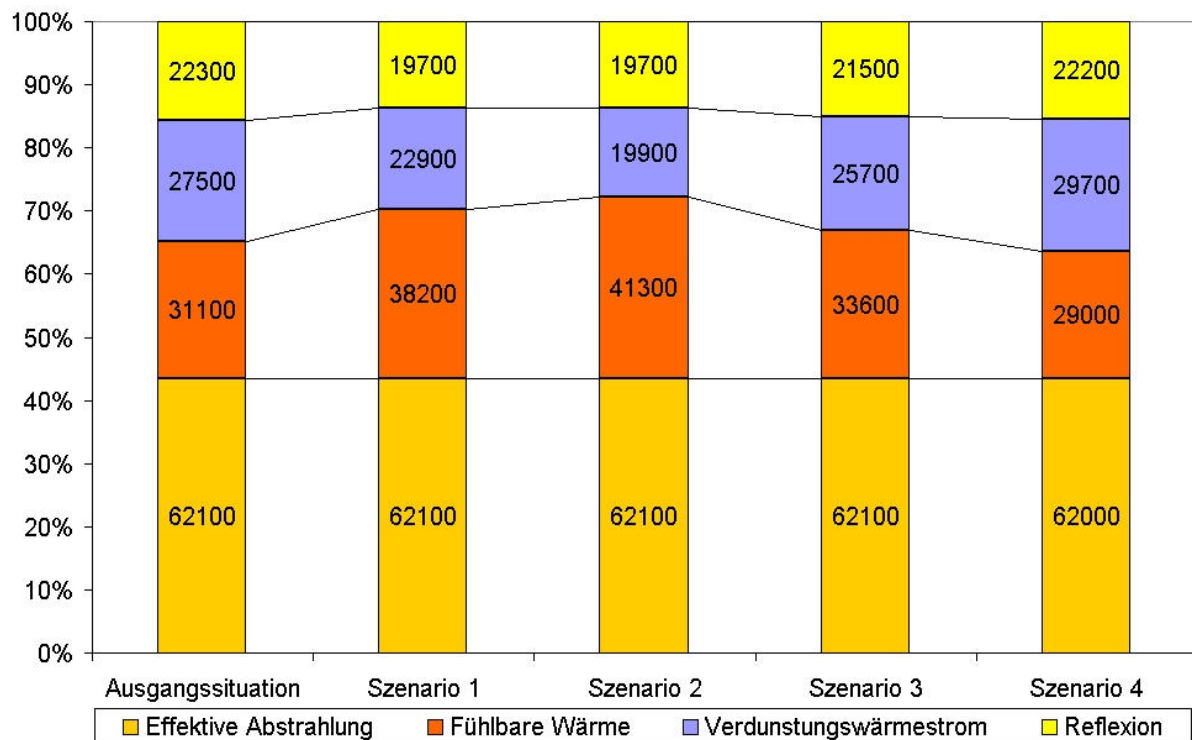


Bild 4-13

Mittlere jährliche Verdunstungshöhen der Ausgangssituation im Gebiet und Änderungen der Verdunstung für die Szenarien 1 - 4 im Untersuchungsgebiet Triangeln

Bild 4-14 zeigt die mittleren jährlichen Energiebilanzen für die Ausgangssituation und die Szenarien 1 - 4. Diese sind eine direkte Folge der Veränderungen der Wasserbilanzen. Die Albedo bleibt trotz der Landnutzungsänderungen weitgehend gleich, so dass die Verschiebungen der Komponenten der Energiebilanzen hauptsächlich durch den Verdunstungswärmestrom bestimmt werden.



**Bild 4-14** Mittlere jährliche Energiebilanz für die Ausgangssituation und die Szenarien 1 - 4 im Untersuchungsgebiet Triangeln [GJ/a]

Für die Dauer der Bauarbeiten ist eine deutliche Erhöhung des fühlbaren Wärmestroms erkennbar. Ursache sind die zusätzlichen versiegelten Flächen. Im relativ kleinen Untersuchungsgebiet, einem Quartier von 160 x 310 m Größe, verbleibt im Durchschnitt eine zusätzliche Energiemenge von 7 480 GJ pro Jahr. Das entspricht dem Heizwert von 204 000 m<sup>3</sup> Erdgas oder dem mittleren Jahreswärmebedarf von 82 Haushalten. Aufgrund des ausgeprägten Jahresganges der Verdunstung konzentriert sich diese Wärme auf die Sommermonate, in denen ohnehin ausreichend Wärme zur Verfügung steht und eher eine Kühlung gewünscht wird. Damit werden sich die Lufttemperaturen im Sommer durch die fehlende Kühlwirkung der Verdunstung spürbar erhöhen.

Für die Umgestaltung der Bereiche um die Eingänge nach der Fertigstellung des Untergrundbahnhofs sind die Veränderungen im konventionellen Szenario 3 aufgrund des bereits hohen Versiegelungsgrades des Gebietes vergleichsweise gering. Das verdunstungsorientierte Szenario 4 zeigt jedoch, dass durch geeignete Maßnahmen selbst auf einer kleinen Fläche eine spürbare Verbesserung der Bilanz erreicht werden kann.

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Ziel der Arbeit war die Untersuchung der Verdunstung in bebauten Gebieten. Es sollte analysiert werden, wie die Reduzierung der Verdunstung infolge der Versiegelung in bebauten Gebieten so gering wie möglich gehalten werden kann.

Trotz der außerordentlichen Bedeutung der Verdunstung als dem Prozess, der den Wasserkreislauf mit dem Energiekreislauf der Erde verbindet, wird sie in den meisten Fällen nur als Restgröße behandelt. Die „Vernachlässigung“ der Verdunstung lässt sich überspitzt mit dem Sprichwort: „Aus den Augen, aus dem Sinn“ beschreiben: In der Stadtbautechnik und der Siedlungswasserwirtschaft wurde von Beginn an der Schwerpunkt auf den Oberflächenabfluss gelegt, da die Folgen einer nicht funktionierenden Oberflächenentwässerung sofort sichtbar waren. Eine verstärkte Orientierung auf die Versickerung begann erst vor wenigen Jahrzehnten, nachdem infolge der zunehmenden Versiegelung und der dadurch verhinderten Versickerung die Grundwasserspiegel in einigen Ballungsgebieten bedrohlich gesunken waren. Die Auswirkungen der verringerten Verdunstung, die von den Komponenten des Wasserkreislaufs durch die Bebauung am stärksten reduziert wird, sind auch heute nicht sofort sichtbar. Entsprechend wenig wird sie von der Öffentlichkeit wahrgenommen.

Im Abschnitt Theoretische Grundlagen wurde der physikalische Prozess der Verdunstung und dessen Funktion im Wasser- und Energiekreislauf beschrieben. Durch die Kopplungswirkung sind bei Änderungen der Verdunstung immer beide Kreisläufe betroffen. Ausführlich wurden die klimatischen, geologischen und biologischen Einflussfaktoren auf die Verdunstung erläutert.

Als Grundlage für die Ermittlung der tatsächlichen Verdunstungshöhe wurde die Gras-Referenzverdunstung ausgewählt. Sie ermöglicht als standardisiertes Verfahren eine sehr gute Vergleichbarkeit der anhand der klimatischen Bedingungen am Standort ermittelten potenziellen Verdunstung. Die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung wurde mit dem BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren auf der Basis der Gras-Referenzverdunstung und unter Berücksichtigung der von der Landnutzung abhängigen Standortbedingungen durchgeführt. Mit der Anwendung dieses Verfahrens konnte erreicht werden, dass für die Untersuchungen nur Ausgangsdaten benötigt werden, die für die meisten Gebiete vorliegen oder ohne großen Aufwand verfügbar sind. Damit soll eine einfache Anwendung in der Praxis möglich werden.

Die Berechnungen wurden mit langjährigen Mittelwerten der Klimadaten aus dem Zeitraum 1961 bis 1990 durchgeführt. Die starken jährlichen Schwankungen des Wettergeschehens werden durch die Mittelwertbildung über einen 30-jährigen Zeitraum ausgeglichen. Auf der Basis dieser Daten können die langfristigen Auswirkungen der Landnutzungsänderungen verdeutlicht werden.

Die bisher übliche Bemessung der Entwässerungsanlagen mit extremen Starkregenereignissen trifft keine Aussagen zu den langfristigen Auswirkungen des Systems. Sie ist jedoch erforderlich für die Ermittlung der Dimensionen der Anlagen und zeigt die Spitzenbelastung des Vorfluters. Die dauerhaften Auswirkungen der Landnutzungsänderungen auf den Wasser- und Energiekreislauf, die den Umfang des Eingriffs in den Naturhaushalt erkennen lassen, sind erst in der langjährigen mittleren Jahresbilanz sichtbar. Es sollten deshalb bei allen Vorhaben beide Aspekte untersucht werden: Zum einen die Bemessung für das maßgebende Starkregenereignis zur Dimensionierung der Entwässerungsanlagen und zum anderen die Berechnung der mittleren jährlichen Wasserbilanz zur Ermittlung der dauerhaften Auswirkungen.

Die Verdunstung ist ein Prozess, der nur an der Oberfläche von Körpern stattfindet. Neben den klimatischen Bedingungen ist damit die Landnutzung für die Verdunstungshöhe entscheidend. Dazu wurde ein Katalog der Landnutzungsarten für unbebaute und bebaute Gebiete erstellt. Als Grundlage konnte die Nomenklatur der CORINE-Landnutzungsdaten genutzt werden. Diese wurde zur genaueren Unterscheidung versiegelter und bewachsener Flächen innerhalb bebauter Gebiete ergänzt. Die Kenntnisse zum Verhalten der Oberflächen unbebauter Gebiete sind für den Vergleich der Situation vor und nach der Bebauung und damit für Aussagen zu den dauerhaften Auswirkungen erforderlich. Für alle Landnutzungsarten wurden die hydrologischen und energetischen Eigenschaften und deren Auswirkungen auf den Wasser- und Energiehaushalt erläutert.

Die theoretischen Überlegungen zu den Auswirkungen der Landnutzungsänderung wurden an zwei Anwendungsbeispielen verdeutlicht. Das Beispiel der Erschließung des Industrie- und Gewerbegebietes „Goldene Höhe - Teilgebiet 4“ zeigt die gravierenden Auswirkungen der großflächigen Versiegelung vorher land- und forstwirtschaftlich genutzter Flächen mit konventionellen Dächern und Asphalt. Der Oberflächenabfluss wird aufgrund der Reduzierung von Verdunstung und Versickerung extrem erhöht. Entsprechend verringert sich der Verdunstungswärmestrom und da aufgrund der niedrigeren Albedo zugleich mehr Energie absorbiert wird, steigt in der Jahresbilanz der fühlbare Wärmestrom erheblich an. Die im Genehmigungsverfahren festgelegten umfangreichen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen können davon nur einen Teil durch erhöhte Verdunstung ausgleichen. Zudem sind diese Gebiete mehrere Kilometer entfernt.

Der hohe Anteil versiegelter Dach- und Straßenflächen mit sehr geringer Verdunstung im Vergleich zur vorherigen land- und forstwirtschaftlichen Nutzung verhindert einen durchgreifenden Ausgleich der reduzierten Verdunstung. Ansatzpunkt muss deshalb eine möglichst geringe Versiegelung sein. Dies wäre bei dem hohen Anteil von Dachflächen in Industriegebieten durch Dachbegrünungen erreichbar.

Für die Bebauung der nächsten Abschnitte wurde vorgeschlagen, die im Bebauungsplan nur



unverbindlich empfohlene Dachbegrünung in Form von extensiven Gründächern verbreitet einzusetzen. Die Oberflächenentwässerung sollte überwiegend durch die Ableitung in offenen Gräben und mittels zeitweise mit Wasser gefüllten Mulden erfolgen.

Im zweiten Beispiel, den Auswirkungen der Landnutzungsänderungen beim Bau der Untergrundstation Triangeln in Malmö, wurde eine Lösung vorgeschlagen, mit der die verringerte Verdunstung weitgehend ausgeglichen werden kann. Das war möglich, da durch die dichte Bebauung in der Innenstadt von Malmö der Verdunstungsanteil bereits deutlich reduziert ist. Erreicht wurde dies hauptsächlich mit einer umfangreichen Dachbegrünung, aber auch mit Versickerungsmulden und einer offenen Wasserfläche.

Die Untersuchungen in der dicht besiedelten Innenstadt von Malmö zeigen die Wirkung der Verdunstung als „Klimaanlage“ der Städte. Mit der reduzierten Verdunstung wird der Abtransport der eingestrahlten Wärmeenergie verringert und es erhöht sich der fühlbare Wärmestrom. Das geschieht im Sommer, wenn ohnehin ausreichend Wärme zur Verfügung steht. Dagegen könnte die Verdunstung in diesen Zeiten mit hoher Energieeinstrahlung und ausreichender Wasserverfügbarkeit ein angenehmes Stadtklima aufrechterhalten.

Bisher noch nicht zufrieden stellend gelöst ist die Erfassung der Wechselwirkungen von aneinander grenzenden Flächen mit unterschiedlichen Landnutzungsarten und damit Verdunstungseigenschaften. Diese Wirkungen wurden deshalb vernachlässigt.

Wenige Untersuchungen liegen außerdem zum genauen Verdunstungsverhalten kleiner Wasserflächen, wie sie verbreitet in bebauten Gebieten anzutreffen sind, vor. Durch den Oaseneffekt können kleine Teiche bei Zufuhr von Energie aus angrenzenden Gebieten sehr hohe Verdunstungsleistungen erreichen und in Verbindung mit ihrer Funktion als Zwischenspeicher entscheidend zum Ausgleich der reduzierten Verdunstung versiegelter Flächen beitragen.

Das Verdunstungsverhalten zeitweilig mit Wasser gefüllter Gräben und Mulden ist ebenfalls nur wenig untersucht. Die offene Ableitung von Oberflächenwasser in offenen Gräben und Mulden und die damit verbundene Versickerung und Verdunstung bringt eine positive klimatische Wirkung. Zudem bietet sie gleichzeitig Chancen für eine kostengünstige Entwässerung und besitzt in urbanen Gebieten ein hohes gestalterisches Potenzial. Mit der zunehmenden Verbreitung dieser Entwässerungsmethode sind dafür genauere Erkenntnisse erforderlich.

Offen sind weiterhin die Auswirkungen des anthropogen bedingten Klimawandels. Dieser führt gemäß den aktuellen Modellberechnungen zu einer Erhöhung der mittleren Lufttemperatur. Es steht damit mehr Energie zur Verfügung und die potenzielle Verdunstung wird steigen. Allerdings kann noch nicht eingeschätzt werden, ob sich dadurch auch die tatsächliche Verdunstung erhöht. Dies ist nur möglich, wenn für den erhöhten Verdunstungsanspruch der

Luft zusätzliches Wasser zur Verfügung steht. Die ebenfalls prognostizierte Zunahme der Starkniederschläge bei nur wenig geänderter Jahresniederschlagsmenge und die Abnahme der Sommerniederschläge in einigen Gebieten könnten insgesamt eher zu einer Abnahme der tatsächlichen Verdunstung führen. Steigt die tatsächliche Verdunstung nicht in dem Maße wie die mittlere Lufttemperatur, wird sich durch die Kopplung von Wasser- und Energiekreislauf die Temperaturerhöhung weiter beschleunigen. Denn die Energiemenge, die nicht über die Verdunstung in höhere Schichten der Atmosphäre transportiert und von dort ins All abgestrahlt werden kann, verbleibt in der bodennahen Luftschichten und trägt zur weiteren Erwärmung bei.

Die Erschließung neuer Baugebiete ist mit einem erheblichen Eingriff in den Naturhaushalt verbunden. Entscheidendes Kriterium bei der Planung neuer Baugebiete muss deshalb sein, dass der langjährige Wasser- und Energiehaushalt des Standorts so gering wie möglich verändert wird. Die Untersuchung der langjährigen Wasser- und Energiebilanzen ist dazu unerlässlich.

Eine Bund-Länder-Kommission befasst sich gegenwärtig mit einem Anhang zur Abwasserverordnung. Darin soll der Stand der Technik für den Umgang mit Regenwasser festgelegt werden. Vorgesehen ist eine verbindliche Untersuchung des lokalen Wasserhaushalts bei neu zu erschließenden Gebieten [Sieker et al. 2007]. Die Komponenten des Wasserkreislaufs dürfen nur bis zu einem bestimmten Prozentsatz gegenüber der Ausgangssituation verändert werden. Über die Höhe der zulässigen Veränderung wird gegenwärtig diskutiert. Dieser Ansatz zwingt zu einer verstärkten Betrachtung der Verdunstung, da diese durch die Bebauung am meisten beeinflusst wird und zudem den Wasserkreislauf mit dem Energiekreislauf verbindet.

## 6 Literatur

**Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für**

**Geowissenschaften und Rohstoffe** [2005]: Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5), Stuttgart, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung

**Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für**

**Geowissenschaften und Rohstoffe** [2003]: Methodendokumentation Bodenkunde. In: Geologisches Jahrbuch Reihe G, Heft SG1, Hannover, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung

**Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L.S.** [1994]: An Update for Definition of Reference Evapotranspiration, ICID Bulletin 43, Nr. 2

**Architekturbüro Leipoldt** [2005]: Begründung zum Bebauungsplan Industrie- und Gewerbegebiet "Goldene Höhe - Teilgebiet H4", Treuen

**Bagrov, N.A.** [1953]: O srednem mnogoletnem isparenii s poverchnosti suši (Über die mittlere vieljährige Verdunstung von der Oberfläche des Festlandes). In: Meteorologia i Gidrologia, Nr. 10, S. 20 - 25 (russisch), Leningrad

**Bagrov, N.A.** [1954]: O rasčete isparenija s poverchnosti suši (Über die Berechnung der Verdunstung von der Oberfläche des Festlandes). In: Meteorologia i Gidrologia, Nr. 2, S. 12 - 18 (russisch), Leningrad

**Baumgarten, A., Liebscher H.-J.** [1996]: Lehrbuch der Hydrologie, Berlin, Gebrüder Borntraeger

**Baumgartner, A., Reichel, E.** [1975]: Die Weltwasserbilanz - Niederschlag, Verdunstung und Abfluss über Land und Meer sowie auf der Erde im Jahresdurchschnitt, München, R. Oldenbourg

**Bernhofer, C. et al.** [2005]: Vertical transports of energy and trace gases at anchor stations and their spatial and temporal extrapolation under complex natural conditions. In: Results of German Atmospheric Programme - AFO2000, Bonn, Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Blüthgen, J., Weischet, W.** [1980]: Allgemeine Klimageographie, Berlin, De Gruyter

**BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit** [2001]: Hydrologischer Atlas von Deutschland, Bonn, fvd Freiburg

**Borgwardt, S.** [1995]: Die Versickerung auf Pflasterflächen als Methode der Entwässerung von minderbelasteten Verkehrsflächen, Hannover, Universität Hannover

**Brockhaus** [1999]: Brockhaus - Die Bibliothek: Lebensraum Erde, Leipzig, F.A. Brockhaus

**Bronstert, A., Fritsch, U., Katzenmaier, D.** [2001]: Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten, Potsdam, Institut für Klimafolgenforschung

- Bundesministerium für Bildung und Forschung** [2005]: Results of the German Atmospheric Research Programme - AFO 2000, Berlin, Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Bunzel, A., Hinzen, A., Ohligschläger, G.** [1997]: Umweltschutz in der Bebauungsplanung, Wiesbaden, Bauverlag
- Buttschardt, T.** [2001]: Extensive Dachbegrünungen und Naturschutz, Karlsruhe, Institut für Geographie und Geoökologie der Universität Karlsruhe
- COST - European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research** [2008]: Improving relations between technical infrastructure and vegetation - Final scientific report COST Action C15 - Urban civil engineering, COST Office, Brüssel
- DFG - Deutsche Forschungsgemeinschaft** [1987]: Anthropogene Einflüsse auf den lokalen und regionalen Bodenwasserhaushalt, Bd. 1, Weinheim, Verlag Chemie
- DIN 19685** [1997]: Klimatologische Standortuntersuchung - Ermittlung der meteorologischen Größen, Berlin, Beuth
- DIN 4049-3** [1994]: Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Berlin, Beuth
- Disse, M.** [1995]: Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung in ebenen Einzugsgebieten - IHW Heft 53, Karlsruhe, Universität Karlsruhe
- Dörhöfer und Josopait** [1980]: Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. In: Geologisches Jahrbuch C27, Hannover
- Du Bois, W.** [1995]: Planerische Optionen des kommunalen Umweltschutzes. In: Umweltpolitik, Berlin, Deutsches Institut für Urbanistik
- Dürr, A.** [1994]: Dachbegrünung - ein ökologischer Ausgleich, Wiesbaden, Bauverlag
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall** [1982]: Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlags - Abfluss - Modellen in kleinen Einzugsgebieten - DWA Regeln Heft 112, Hamburg, Paul Parey
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall** [1996]: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen - DWA Merkblatt 238, Bonn, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall** [1999]: Einflüsse land- und forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss - DWA Materialien 7/99, Bonn, DWA
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall** [2002]: Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden - DWA Merkblatt M504, Hennef, DWA
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall** [2003]: Regenwassertage 2003, Hennef, DWA

- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Arbeitsgruppe HW - 1.2 „Verdunstung“** [2004]: Differenzierte Parametrisierung von Verfahren zur Verdunstungsbestimmung unter Berücksichtigung von Bodenfeuchte und Phänologie. In: Wasserwirtschaft Heft 05/2004, Hennef, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall** [2007]: Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser - DWA Merkblatt M153, Hennef, DWA
- DWD - Deutscher Wetterdienst** [1996]: Klimadaten von Deutschland, Zeitraum 1961 - 1990, Offenbach, Deutscher Wetterdienst
- Dyck, S.** [1978]: Angewandte Hydrologie Teil 2, Berlin, Verlag für Bauwesen
- Dyck, S., Peschke, G.** [1995]: Grundlagen der Hydrologie, Berlin, Verlag für Bauwesen
- Eawag - Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs** [2005]: Wasser- und Materialflüsse bei der Entwässerung von Metall-, Ziegel-, Kies- und Gründächern, Dübendorf, Schweiz, Eawag
- Emeis, S.** [2000]: Meteorologie in Stichpunkten, Berlin, Gebrüder Borntraeger
- Endlicher, W.** [1991]: Klima Wasserhaushalt Vegetation, Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft
- EEA - European Environment Agency** [2005]: European Environment - State and outlook 2005, Kopenhagen, OPOCE
- FBR - Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung** [2001]: Regenwassernutzung und -bewirtschaftung im internationalen Kontext - Internationale Regenwassertage 2001 in Mannheim, Darmstadt, Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung
- Fezer, F.** [1995]: Das Klima der Städte, Gotha, Justus Perthes
- Fleck, W.** [1987]: Einfluss des Bodenaufbaus und des Waldbestandes auf Verdunstung und Abflussbildung im Naturpark Schönbuch bei Tübingen, Tübingen, Geowissenschaftliche Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen
- Flemming, G.** [1987]: Wald Wetter Klima, Berlin, Deutscher Landwirtschaftsverlag
- FLL - Forschungsgesellschaft Landschaftsbau Landschaftsentwicklung** [2002]: Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen, Bonn, Schriftenreihe des FLL
- Franke, T., Bayer, S.** [1995]: Lebensraumtyp Teiche, Landschaftspflegekonzept Bayern Band II.7, Laufen, Bayrisches Staatsministerium für Landesnatur und Umweltfragen
- Fritsch, A.** [2002]: Leitfaden zur Fassadenbegrünung, Leipzig, Stadt Leipzig Amt für Umweltschutz
- Fritsche, R.** [1906]: Niederschlag, Abfluss und Verdunstung auf den Landflächen der Erde, Halle, Vereinigte Friedrichs-Universität Halle-Wittenberg

- Frühauf, C.** [1997]: Verdunstungsbestimmung von Wäldern am Beispiel eines hundertjährigen Fichtenbestandes im Tharandter Wald, Dresden, TU Dresden
- FSGV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen** [1998]: Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen in Verkehrsflächen, Köln, FGSV
- Gertis, K., Wolfseher, U.** [1977]: Veränderungen des thermischen Mikroklimas durch Bebauung. In: Gesundheits-Ingenieur 1/2 1977 S. 1 - 10, Essen, Oldenbourg Industrieverlag
- Gilbert, O. L.** [1994]: Städtische Ökosysteme, Radebeul, Neumann
- Glugla, G., Goedecke, M., Wessolek, G., Fürtig, G.** [1999]: Langjährige Abflussbildung und Wasserhaushalt im urbanen Gebiet Berlin. In: Wasserwirtschaft 89 S. 34 - 41, Wiesbaden, Vieweg & Sohn
- Glugla, G., Jankiewicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., Richter, K., Fürtig, G., Krahe, P.** [2003]: Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses - BfG-Bericht 1342, Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde
- Glugla, G., Krahe, P.** [1995]: Abflussbildung in urbanen Gebieten. In: Schriftenreihe Hydrologie / Wasserwirtschaft 14 S. 140 - 160, Bochum, Ruhr Universität
- Golf, W.** [1981]: Ermittlung der Wasserressourcen im Mittelgebirge. In: Wasserwirtschaft und Wassertechnik 31. S. 93 - 95, Berlin, Verlag für Bauwesen
- Grauvogel, M., Schwab, U., Bräu, M., Geissner, W.** [1995]: Lebensraumtyp Stehende Gewässer, Landschaftspflegekonzept Bayern - Band II.8, Laufen, Bayrisches Staatsministerium für Landesnatur und Umweltfragen
- Hall, P., Pfeiffer, U.** [2000]: Weltbericht für die Zukunft der Städte - URBAN 21, Berlin, Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
- Hämmerle, F.** [2002]: Dachbegrünungen rechnen sich. In: Jahrbuch Dachbegrünungen, Braunschweig, Thalacker
- Harlaß, R.** [2002]: Der natürliche Oberflächenabfluss und seine Bedeutung für die Regenwasserbewirtschaftung von Baugebieten. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden, Lehrstuhl Stadtbauwesen
- Harlaß, R., Herz, R.** [2006]: Water balance in urban development - accounting for evapotranspiration. In: Proceedings of International Conference on "Sustainable Urban Development - Interactive development of technical infrastructure and vegetation", Bergen, Norwegen
- Harlaß, R.** [2007]: Abflussreduzierung durch Evapotranspiration. Technische Universität Dresden, Lehrstuhl Stadtbauwesen - 9. Kolloquium Stadtbauwesen, CD-Rom mit Tagungsunterlagen
- Heber, B., Lehmann, I.** [1993]: Stadtstrukturelle Orientierungswerte für die Bodenversiegelung in Wohngebieten, IÖR Schriften Nr. 5, Dresden, Leibnitz-Institut für ökologische Raumordnung (IÖR)

- Heber, B., Lehmann, I.** [1996]: Beschreibung und Bewertung der Bodenversiegelung in Städten - IÖR Schriften Nr. 15, Dresden, Leibnitz-Institut für ökologische Raumordnung (IÖR)
- Heckel, S.** [2003]: Flächendifferenzierte Bestimmung der Grundwasserneubildung im Raum Hoyerswerda mittels verschiedener Verfahren, Freiberg, TU Bergakademie Freiberg
- Helbig, A., Baumüller, J., Kerschgens, M.** [1999]: Stadtklima und Luftreinhaltung, Berlin, Springer
- Hellie, F.** [2004]: Experimentelle Untersuchung und Modellierung des Interzeptions- und Stammspeichers von landwirtschaftlichen Kulturen und Fichtenwald und Charakterisierung ihres Einflusses auf den Gebietswasserhaushalt, Zittau, Internationales Hochschulinstitut
- Herate, M.** [1989]: Bestimmung der potentiellen Verdunstung als Grundlage für die Bemessung der Bewässerung in ariden und semiariden Gebieten, Dresden, TU Dresden
- Herbst, M.** [1997]: Die Bedeutung der Vegetation für den Wasserhaushalt ausgewählter Ökosysteme, Kiel, Universität Kiel
- Herz, R.** [2000]: Abflussbeiwerte für Stadtstraßen, Dresden, TU Dresden Lehrstuhl für Stadtbauwesen
- Herz, R.** [2004]: Vegetation und technische Infrastruktur in der Stadt - Ansätze einer integrierenden Betrachtung. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 53, 1-2, Bauökologie - Wissenschaft nachhaltigen Bauens, S. 69 - 73, Dresden
- Herzog, F., Kunze, J., Weiland, M., Volk, M.** [2001]: Modellierung der Grundwasserneubildung im Lockergesteinbereich Mitteldeutschlands. In: Wasser & Boden 3/2001 S. 32 - 36, Berlin, Paul Parey
- Höschele, K., Moriyama, M., Zimmermann, H.** [1995]: Klimaanalyse für die Stadtplanung, Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe
- Ingenieurbüro Köbsch** [2002]: Baugrundgutachten zum Industrie- und Gewerbegebiet Goldene Höhe in Treuen, Dresden
- Innenministerium Baden Württemberg** [2007]: Städtebauliche Klimafibel Online ([www.staedtebauliche-klimafibel.de](http://www.staedtebauliche-klimafibel.de))
- Junghans, H.** [1969]: Sonnenscheindauer und Strahlungsempfang geneigter Ebenen. In: Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR 85 Bd. XI, Berlin, Meteorologischer Dienst der DDR
- Kaiser, M.** [2004]: Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung als Baustein einer nachhaltigen Siedlungsentwicklung - demonstriert mithilfe der Entwicklung und Umsetzung von Modellprojekten, Dortmund, Universität Dortmund

- Keil, M., Kiefl, R., Strunz, G.** [2005]: CORINE Land Cover 2000 - Europaweit harmonisierte Aktualisierung der Landnutzungsdaten für Deutschland, Oberpfaffenhofen, DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Deutsches Fernerkundungszentrum
- Klaus, D., Stein, G.** [2000]: Der globale Wasserkreislauf und seine Beeinflussung durch den Menschen - Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt Heft 27, Jülich, Forschungszentrum Jülich
- Knoll, S.** [2000]: Das Abflussverhalten von extensiven Dachbegrünungen, Berlin, TU Berlin Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
- Köhler, M.** [1993]: Fassaden- und Dachbegrünung, Stuttgart, Eugen Ulmer
- Köhler, M.** [2004]: Untersuchungen zu ökologischen Vorteilen extensiver Dachbegrünungen. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden Heft 1-2/2004, S. 109 - 114, Dresden, TU Dresden
- Kolb, W.** [1999]: Qualität von Ablaufwasser aus Dachbegrünungen. In: Dach + Grün 4/1999, S. 4-8, Stuttgart, Dieter A. Kuberski
- Kolle, O., Fiedler, F.** [1998]: Messung und numerische Simulation der Energie- und Feuchtebilanz der Bodenoberfläche. In: Plate, E. J. (Hrsg.) Schlussbericht 1998 Weiherbachprojekt, Karlsruhe, Universität Karlsruhe Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft
- Kopinga, J.** [1998]: Evaporation and Water Requirements of Amenity Trees with Regard to the Construction of a Planting Site. In: The Landscape Below Ground Champaign, USA, International Society of Arboriculture
- Lang, J., Wallisch, S.** [1991]: Ein Beitrag zur Verdunstungsberechnung von undurchlässigen Flächen. In: Wasser & Boden 11/1991 S. 690 - 696, Berlin, Paul Parey
- Larcher, W.** [2001]: Ökophysiologie der Pflanzen, Stuttgart, Eugen Ulmer
- Lehn, H., Steiner, M., Mohr, H.** [1996]: Wasser - die elementare Ressource. Leitlinien einer nachhaltigen Nutzung, Berlin, Springer
- LFL - Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft** [2006]: Dezentraler Hochwasserschutz - Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft Heft 11/2006, Dresden, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
- Liebscher, H.-J.** [1995]: Meteorological and Geological Conditions in the Federal Republic of Germany. In: National Report on Hydrological Research 1983 - 1993, Bonn, Deutsche Forschungsgemeinschaft
- Liesecke, H.-J.** [1998]: Das Retentionsvermögen von Dachbegrünungen. In: Stadt und Grün 1/1998, Berlin, Patzer
- Malmö Citytunnel Group** [2005]: Informationsmaterial City-Tunnel-Projekt, Malmö
- Maniak, U.** [2005]: Hydrologie und Wasserwirtschaft, Berlin, Springer
- Merta, M.** [2001]: Pflanzenphysiologische Messungen zur Berechnung der Verdunstung, Zittau, Internationales Hochschulinstitut Zittau



- Merz, B.** [1996]: Modellierung des Niederschlag-Abfluss-Vorgangs in kleinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität - Mitteilungen des IHW Nr. 56, Karlsruhe, Universität Karlsruhe
- Möcsényi, M., Wiener, S., Blum, W., Rampazzo, N.** [1997]: Bodenaufbau über Tiefgaragen für eine ökologisch wirksamen Baumbestand in Parkanlagen der Stadt Wien - Wiener Modell. Gutachten im Auftrag des Magistrats der Stadt Wien, Wien, Magistrat der Stadt Wien Stadtgartenamt
- Mölders, N.** [1999]: Einfache und akkumulierte Landnutzungsänderung und ihre Auswirkungen auf Evapotranspiration, Wolken- und Niederschlagsbildung, Leipzig, Universität Leipzig Institut für Meteorologie
- Müller, J., Bolte, A., Beck, W., Anders, S., Scharfen, W.** [2001]: Modellierung des Sickerwasserabflusses in einem zusammenhängenden Waldgebiet des nordostdeutschen Tieflands. In: Tagungsunterlagen zur 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning
- Müller, T.** [1999]: Wörterbuch und Lexikon der Hydrologie, Berlin, Springer
- Müller, U.** [1997]: Beziehungen zwischen urbanen Flächenstrukturen und klimatischen Verhältnissen am Beispiel der Stadtregion Leipzig - UFZ-Bericht 2/1997, Leipzig, Umweltforschungszentrum (UFZ)
- Münchow, B.** [1999]: Bodenbeanspruchung durch Versiegelungsmaßnahmen unter der besonderen Berücksichtigung der Wasserdurchlässigkeit und der bodenbiologischen Aktivität - UFZ-Bericht 4/1999, Leipzig, Umweltforschungszentrum (UFZ)
- Nagy, G., Novak, A., Osztroluczky, M.** [1998]: Green design, Budapest, Ybl Miklos Polytechnic
- Nieschulz, K.-P.** [1997]: Mathematisch-bodenkundliche Regionalisierung des Bodenwasserhaushalts, Braunschweig, TU Braunschweig Institut für Geographie und Geoökologie
- Nikinmaa, E.** [2006]: Monitoring tree transpiration to prevent tree damages during tunnel construction in Malmö. In: Proceedings of International Conference on "Sustainable Urban Development – Interactive development of technical infrastructure and vegetation", Bergen, Norwegen, 24.-25.08.
- Ostrowski, M. et al.** [2002]: Wasserbilanzmodelle in der Wasserwirtschaft, Düsseldorf, Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK)
- Petersen, A.** [1986]: Anatomische und physiologische Untersuchungen an Stadtbäumen in Hamburg, Hamburg, Universität Hamburg
- Pfadt, A.** [1990]: Gewerbeentwicklung Siedlungsstruktur und Landschaftsverbrauch, Hamburg, Dr. Krämer
- Renger, M., Wessolek, G.** [1990]: Auswirkungen von Grundwasserabsenkungen und Nutzungsänderungen auf die Grundwasserneubildung. In: Mitteilung des Instituts für Wasserwesen, Bd. 38 B, München, Bundeswehr Hochschule München

- Reuter, U., Baumüller, J., Hoffmann, U.** [1991]: Luft und Klima als Planungsfaktor im Umweltschutz, Ehningen, expert
- Richter, D.** [1969]: Die Verdunstungsverluste der oberen Seen Mecklenburgs. In: Besondere Mitteilungen zur Gewässerkunde, Jahrbuch der DDR 9/1969, Berlin
- Richter, D.** [1977]: Zur einheitlichen Berechnung der Wassertemperatur und der Verdunstung von freien Wasserflächen auf statistischer Grundlage, Berlin, Akademieverlag
- Richter, D.** [1997]: Das Langzeitverhalten von Niederschlag und Verdunstung und dessen Auswirkung auf den Wasserhaushalt des Stechlinseegebietes, Offenbach, Selbstverlag des DWD
- Richter, D.** [1984]: Klimadaten der DDR, Reihe B, Bd. 6 "Verdunstung", Potsdam, Meteorologischer Dienst der DDR
- Ringler, A. Rehding, G. Bräu, M.** [1994]: Lebensraumtyp Bäche und Bachufer, Landschaftspflegekonzept Bayern Band II.19, Laufen, Bayrisches Staatsministerium für Landesnatur und Umweltfragen
- Scheffer, F., Schachtschabel, P.** [1998]: Lehrbuch der Bodenkunde, Stuttgart, Ferdinand Enke
- Schindler, U., Thiere, J., Steidl, J., Müller, L.** [2003]: Entwicklung einer bodenhydrologischen Datenbank auf Basis des Flächentypenkonzeptes und Anwendung für die Abflussberechnung in Nordostdeutschen Einzugsgebieten. In: Tagungsunterlagen zur 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning
- Schmidt, M.** [2004]: Gebäudebegrünung als Element der Energieeinsparung und Regenwasserbewirtschaftung. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 1-2/2004, Dresden, TU Dresden
- Schmugge, T., André J.-C.** [1991]: Land Surface Evaporation, New York, Springer
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin** [2003]: Umweltatlas Berlin, Berlin, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung
- Sieker, F., Kaiser, M., Sieker, H.** [2006]: Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung im privaten, gewerblichen und kommunalen Bereich, Stuttgart, Fraunhofer
- Sieker, F., Schlottmann, P., Zweynert, U.** [2006]: Ökologische und ökonomische Vergleichsbetrachtung zwischen dem Konzept der konventionellen Regenwasserentsorgung und dem Konzept der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung. In: Umweltbundesamt Text 19/07, Dessau
- SMUL - Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft** [2002]: Umweltbericht Sachsen 2002, Dresden, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
- Stadt Dresden** [2005]: Umwelterklärung Grünflächenamt 2005, Dresden, Stadt Dresden
- Statistisches Bundesamt** [2006]: Flächenerhebung 2004. In: Wirtschaft und Statistik 03/2006, Wiesbaden, Statistisches Bundesamt

- Steinborn, W.** [2000]: Quantifizierung von Ökosystem-Eigenschaften als Grundlage für die Umweltbewertung, Kiel, Christian-Albrechts-Universität Kiel
- Steinebach, G., Schaadt, D.** [1996]: Stadtökologie in neuen Gewerbegebieten, Wiesbaden, Bauverlag
- Stich, R., Porger, K.-H., Steinebach, G., Jacob, A.** [1992]: Stadtökologie in Bebauungsplänen, Wiesbaden, Bauverlag
- Strotmann, R.** [1997]: Hydrologische Auswirkungen der Siedlungsentwicklung auf den Wasserkreislauf am Beispiel der Stadt Krefeld über den Zeitraum 1800 bis 1995, Aachen, Becker-Kuns
- Sukopp, H., Wittig, R.** [1993]: Stadtökologie, Stuttgart, Gustav Fischer
- Sydow, A., Rufeger, W., Rosé, H., Aßelmeyer, T.** [1996]: Bestandsaufnahme zu Potentialen und Grenzen vorhandener Modelle - Abschlussbericht zum HGF-Projekt: Untersuchung zu einem integrativen Konzept nachhaltiger Entwicklung: Bestandsaufnahme, Problemanalyse, Weiterentwicklung, Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe
- Tekna** [2006]: Sustainable Urban Development – Interactive development of technical infrastructure and vegetation. Proceedings of International Conference in Bergen, Norwegen, 24.-25.08., Oslo
- Tetzlaff, G., Dörhöfer, G., Kunkel, R., Wendland, F.** [2003]: GIS-gestützte Ermittlung der Grundwasserneubildung in Niedersachsen. In: Wasser & Boden 7+8/2003 S. 53 - 57, Berlin, Paul Parey
- Thamm, S.** [1999]: Standortspezifische Lebenserwartung von Straßenbäumen, Modellierung und empirische Analyse für die Stadt Malmö. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden Lehrstuhl Stadtbauwesen
- Uhl, M., Schiedt, L., Mann, G., Henneberg, M.** [2003]: Langzeitstudie zum Abflussverhalten begrünter Dächer. In: Wasser & Boden 3/2003 S. 28 - 36, Berlin, Paul Parey
- UBA - Umweltbundesamt** [2003]: Reduzierung der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr - UBA Texte 90/03, Berlin, Umweltbundesamt
- UBA - Umweltbundesamt** [2004]: Hintergrundpapier: Flächenverbrauch, ein Umweltproblem mit wirtschaftlichen Folgen, Berlin, Umweltbundesamt
- UBA - Umweltbundesamt / Statistisches Bundesamt** [2002]: Umweltdaten Deutschland, Berlin / Wiesbaden, Umweltbundesamt / Statistisches Bundesamt
- Unger, B., Jäschke, U., Kropop, S., Pölmann, W., Richter, J., Unger, T., Weber, R.** [2004]: Der Vogtlandatlas, Chemnitz, Klaus Gumnior
- Vietinghoff, H.** [2000]: Die Verdunstung freier Wasserflächen, Allensbach, UFO-Atelier für Gestaltung und Verlag
- Wallacher, J.** [1999]: Lebensgrundlage Wasser, Stuttgart, Kohlhammer

- 
- Wessolek, G., Facklam, M.** [1997]: Standorteigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen. In: Pflanzenernährung und Bodenkunde, 160, S. 41 - 46, Weinheim, Verlag Chemie
- Wittenberg, H.** [1985]: Evaporation from Fresh and Salt Water Lakes - Studies for two Hydro Solar Energy Projects. In: Beiträge zur Hydrologie, Sonderheft 5.2, Kirchzarten
- Wohlrab, B., Ernstberger, H., Meuser, A., Sokollek, V.** [1992]: Landschaftswasserhaushalt Hamburg, Paul Parey
- WMO - World Meteorological Organisation** [2003]: Our Future Climate - WMO - No 952, Genf, World Meteorological Organisation

## Anhang A - Erläuterungen zum Berechnungsprogramm

Die Wasser- und Energiebilanzen werden mit dem Excel-Tabellenkalkulationsprogramm berechnet. Dazu wurden die Algorithmen für die unterschiedlichen Landnutzungsarten mithilfe der VBA-Programmiersprache in das Programm eingearbeitet.

Die Verdunstung der unbebauten und bebauten Landflächen wird mit den im BAGLUVA-Wasserhaushaltverfahren enthaltenen und den zusätzlich erarbeiteten Ansätzen ermittelt. Für die Berechnung der Wasserflächen wird das Temperaturnausgleichsverfahren genutzt.

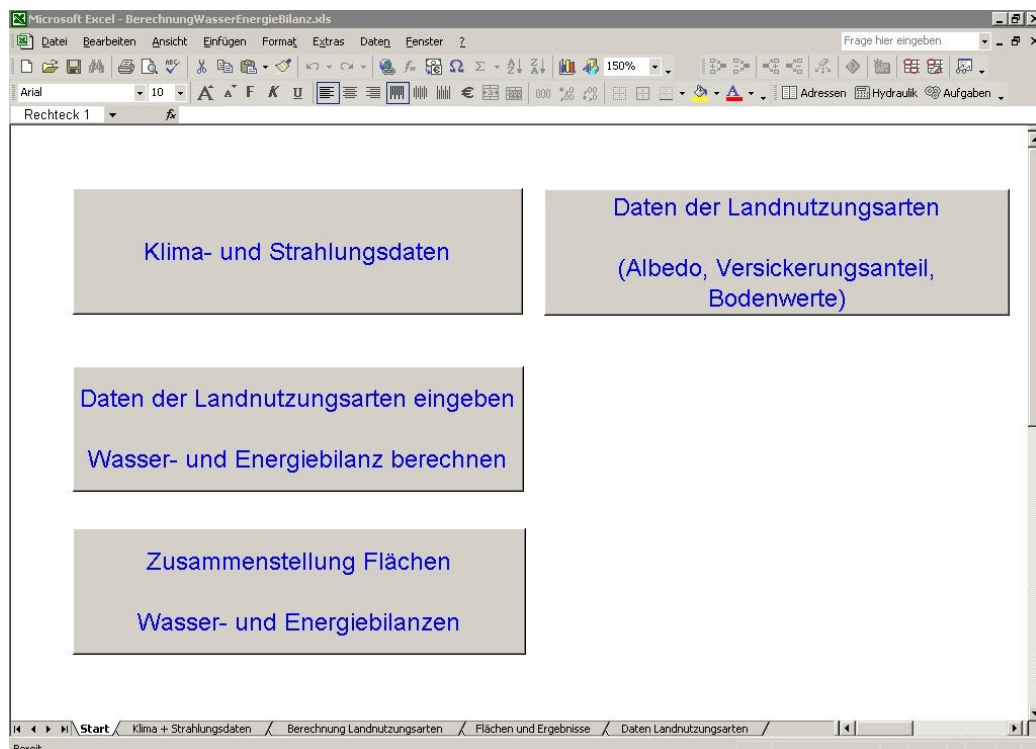
Alle Ausgangsdaten, Berechnungen und Ergebnisse werden in einer Datei verwaltet. Für den Vergleich der Situation vor und nach der Bebauung oder für die Untersuchung verschiedener Szenarien sind jeweils separate Dateien anzulegen.

Die Datei enthält die Tabellenblätter:

1. Start
2. Klima + Strahlungsdaten
3. Berechnung Landnutzungsarten
4. Flächen und Ergebnisse
5. Daten Landnutzungsarten

### Verfahrensablauf

1. Nach dem Öffnen der Datei erscheint ein Startbildschirm, von dem aus die erforderlichen Tabellenblätter aufgerufen werden.



- Microsoft Excel - BerechnungWasserEnergieBilanz.xls

Datei Bearbeiten Ansicht Einfügen Format Extras Daten Fenster ? Frage hier eingeben

Arial 10

A31

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	<b>Langjährige Jahresmittelwerte 1961 - 1990</b>												
2	Quelle (1)	Korrigierter Niederschlag					P <sub>kor</sub>	550	mm/a	<b>Geografische Breite</b> 50,5°			
3	Quelle (1)	Korrigierter Niederschlag im Sommerhalbjahr					P <sub>kor SHJ</sub>	320	mm/a				
4	Quelle (2)	Gras - Referenzverdunstung					ET <sub>0</sub>	580	mm/a				
5	<b>Monatsmittelwerte für den Zeitraum 1961 - 1990</b>												
6		Luft-temperatur	Luft-feuchtigkeit	Wind-geschwindigkeit in 2m Höhe	tägliche Sonnenscheindauer		astronomisch mögliche Sonnenscheindauer	extra-terrestrische Strahlung	Albedo Wasseroberfläche	Koeffizienten für Globalstrahlung		Koeffizienten der Windfunktion	
7		T	U	v	S		S <sub>0</sub>	R <sub>0</sub>	α	a	b	a	
8		°C	%	m/s	h/Monat	h/d	h/d	W/m²	-	-	-	0,17	
9	Januar	-2,3	85	2,8	49,6		1,6	8,6	107	0,11	0,19	0,54	
10	Februar	-1,5	83	2,6	65,9		2,4	10,1	170	0,09	0,19	0,57	
11	März	1,9	79	2,8	101,0		3,3	11,9	265	0,07	0,19	0,57	
12	April	5,8	75	2,6	134,0		4,5	13,8	367	0,06	0,19	0,57	
13	Mai	10,8	72	2,3	168,0		5,4	15,4	445	0,06	0,19	0,57	
14	Juni	14,0	73	2,1	173,0		5,8	16,3	481	0,06	0,19	0,55	
15	Juli	15,7	72	2,2	189,0		5,9	15,9	463	0,06	0,19	0,54	
16	August	15,2	75	2,2	174,0		5,6	14,4	398	0,06	0,19	0,53	
17	September	12,3	79	2,6	143,0		4,8	12,6	304	0,07	0,19	0,54	
18	Oktober	8,0	82	2,4	121,0		3,9	10,8	204	0,06	0,19	0,54	
19	November	2,6	85	3,0	58,4		1,9	9,1	125	0,11	0,19	0,54	
20	Dezember	-1,0	86	2,9	41,8		1,3	8,2	89	0,12	0,19	0,53	
21	<b>Daten aus Wetterbeobachtung</b>						<b>abhängig von geografischer Breite</b>						
22	Quelle (3)	Quelle (4)		Quelle (5)		DWA M 238	DWA M 238	DWA M 238	DWA M 238	DWA M 238			
23						Seite 92	Seite 92	Seite 27	Seite 26	Seite 24			
24						Tafel 9.4 a	Tafel 9.4 c	Tafel 5.4	Tafel 5.3	Tafel 5.1			
25	Quellen	(1) DWD 1961-1990 www.dwd.de Klimadaten, Werte für 4748 Stationen verfügbar											
26		(2) Hydrologischer Atlas von Deutschland, Tafel 2.12											
27		(3) DWD 1961-1990 www.dwd.de Klimadaten, Werte für 672 Stationen verfügbar											
28		(4) DWD 1961-1990 www.dwd.de Klimadaten, Werte für 44 Stationen verfügbar											
29		(5) DWD 1961-1990 www.dwd.de Klimadaten, Werte für 469 Stationen verfügbar											
30													
31													
32													
33													
34													
35													
36													
37													
38													
39													
40													
41													
42													
43													
44													
45													
46													
47													
48													
49													
50													
51													
52													
53													
54													
55													
56													
57													
58													
59													
60													

### 3. Die erforderlichen Angaben zu den Teilflächen werden auf dem Tabellenblatt „Berechnung Landnutzungsarten“ eingegeben.

Microsoft Excel - BerechnungWasserEnergieBilanz.xls

Frage hier eingeben

B36 Zwischenenergebnisse

	B	C	D	E	F	G	H
1	Berechnung der Wasser- und Energiebilanz für alle Landnutzungsarten			1	2	3	4
2				Spalte berechnen	Spalte berechnen	Spalte berechnen	Spalte berechnen
3	langjähriger Mittelwert der Niederschlagshöhe nach Korrektur der systematischen Messfehler $P_{\text{Korr}}$	550 mm/a		Landnutzungsart wählen	Landnutzungsart wählen	Landnutzungsart wählen	Landnutzungsart wählen
4	korrigierter Niederschlag im Sommerhalbjahr $P_{\text{Korr SHJ}}$	320 mm/SHJ					
5	Gras - Referenzverdunstung $ET_0$	580 mm/a					
6	Ausgangswerte						
7	Bezeichnung Teilfläche	Gesamtfläche [m²]		Dach 01	Straße 01	Einzelbaum 01	Feld 01
8	Fläche [m²]	133.805		45065	30560	2780	12800
9	Hangneigung [°]				6 OstWest		
10	Hangausrichtung						
11	Bodenart der Ausschöpfungszone					Schluff, sandig (sU)	Schluff, sandig (sU)
12	Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität [%]					25,5	25,5
13	Grundwasserflurabstand [m]					2,5	2,5
14	Anteil Versickerung am Gesamtabfluss [%]			0%	10%	90%	95%
15				Dachneigung	Bagrov-Parameter nBagrov	Laub- oder Nadelbaum	Summe Berechnung (mm/a)
16				Dachneigung ≤ 15°	0,11	Laubbaum	
17				Bagrov-Parameter nBagrov	Vorgabe: 0,11	mittlere Lebenserwartung [a]	Lös / Schwarzerde
18				0,16		150	nein
19	Besondere Angaben			Vorgabe: >15°:0,09; ≤15:0,11		Standortbedingung Lage innerhalb versiegelter Fläche	
20						Standortbedingung Wasser mittel	
21							
22							
23							
24							
25							
26	Wasserbilanz			Berechnung erfolgt	Berechnung erfolgt	Berechnung erfolgt	Berechnung erfolgt
27	Verdunstung	mm/a		143	114	625	515
28	Versickerung	mm/a		0	44	-67	33
29	Oberflächenabfluss	mm/a		407	392	-7	2
30	Energiebilanz					mit Wasser aus Umgebung	mi
31	Reflexion	MJ/(m²×a)		336	403	571	645
32	Verdunstungswärmestrom	MJ/(m²×a)		357	285	1561	1288
33	Fühlbare Wärme	MJ/(m²×a)		1325	1329	-114	85
34	Hinweis					mit Energie aus Umgebung	mi
35							

Bereit

### Dateneingabe

- In jeder Spalte befindet sich eine Schaltfläche zum Aufruf des Dialogfelds für die Auswahl der Landnutzungsart. Die im Katalog der Landnutzungsarten (Tabelle 3-2) erfassten 32 Landnutzungsarten können für jede Spalte aus diesem Dialogfeld ausgewählt werden.

**Auswahl Landnutzungsart**

Landnutzungsart wählen

- leere Spalte -

Dachfläche

Belagsklasse 1 (Asphalt, Beton)

Belagsklasse 2 (Großpfl., Betonverbundpfl., Platten mit Kantenlängen < 8cm)

Belagsklasse 3 (Kleinpfl., Mosaikpfl., Platten mit Kantenlängen > 8cm)

Belagsklasse 4 (Rasengitterstein, Schotterrasen)

Parkanlage

Sträucher, Büsche

Wiesen, Rasen

Einzelbaum

Gründach, extensiv 1, Aufbau bis 10 cm Stärke

Gründach, extensiv 2, Aufbau > 10 bis 20 cm Stärke

Gründach, intensiv 1, Aufbau > 20 bis 50 cm Stärke

Gründach, intensiv 2, Aufbau > 50 cm Stärke

Fassadenbegrünung

Versickerungsmulde

Komplexe Parzellenstrukturen / Kleingärten

Ackerland

Weinbauflächen

Obst- und Beerenobstbestände

Wiesen und Weiden

Laubwald

Nadelwald

Mischwald

Natürliches Grünland

Heiden und Moorheiden

Wald - Strauch - Übergangsstadien

Strände, Dünen, Sandflächen

Felsflächen ohne Vegetation

Flächen mit spärlicher Vegetation

Stehende Gewässer

Wasserflächen mit Wasserpflanzen

Fließgewässer

Abbrechen

OK



- Nach der Wahl der Landnutzungsart wird die Spalte für diese Landnutzung angepasst. Es werden alle auszufüllenden Zellen grau hinterlegt. Speziell für diese Landnutzungsart erforderliche Eingabewerte werden angegeben.
- Es werden Auswahllisten für Angaben wie Bodenart, Hangausrichtung, Dachneigung, Baumart, Standortbedingungen und weitere spezielle Angaben angelegt. Die Daten für die Auswahllisten sind im Tabellenblatt „Daten Landnutzungsarten“ gespeichert und können bei Bedarf verändert werden.
- Weiterhin wird der Anteil der Versickerung am Gesamtabfluss vorgegeben. Dieser Wert ist im Tabellenblatt „Daten Landnutzungsarten“ für jede Landnutzungsart als Vorgabewert aufgeführt und kann bei Bedarf verändert werden.
- In Tabelle A-1 sind die geforderten Eingabewerte für alle Landnutzungsarten sowie die Vorgabewerte aufgeführt (Seite A 10 - A 14).

### Berechnung Einzelspalte

- Jede Spalte kann einzeln berechnet werden. Dabei erfolgt noch keine Aufstellung der Bilanz der Gesamtfäche.
- Beim Aufruf der Berechnung wird die Vollständigkeit der Eingabedaten für jede Landnutzungsart geprüft. Zellen mit fehlenden Daten werden rot hinterlegt und ein Hinweis auf die fehlenden Daten angezeigt.
- Die Ergebnisse der Berechnung werden in die jeweilige Spalte eingetragen  
 Zeilen 27 - 29: Verdunstung, Versickerung, Oberflächenabfluss  
 Zeilen 31 - 33: Reflexion, Verdunstungswärmestrom, fühlbare Wärme

### Berechnung der Wasser- und Energiebilanz über alle Spalten

- Die Schaltfläche „Berechnung der Wasser- und Energiebilanz für alle Landnutzungsarten“ in der oberen rechten Ecke startet die Berechnung der Wasser- und Energiebilanz über alle Teilflächen.
- Beim Aufruf der Berechnung wird die Vollständigkeit der Eingabedaten für jede Landnutzungsart geprüft. Zellen mit fehlenden Daten werden rot hinterlegt und ein Hinweis auf die fehlenden Daten angezeigt.
- Die Ergebnisse der Berechnung der Spalten werden in jeder Spalte eingetragen  
 Zeilen 27 - 29: Verdunstung, Versickerung, Oberflächenabfluss  
 Zeilen 31 - 33: Reflexion, Verdunstungswärmestrom, fühlbare Wärme
- Die Komponenten der Wasser- und Energiebilanz des Gesamtgebietes werden berechnet und in den ersten Spalten der Zeilen 26 bis 33 angezeigt.
- Gleichzeitig werden die Ergebnisse für jede Teilfläche auf dem Tabellenblatt „Flächen und Ergebnisse“ als Übersicht dargestellt.

Microsoft Excel - BerechnungWasserEnergieBilanz.xls

Frage hier eingeben

Adressen Hydraulik Aufgaben

Landnutzungsart	landnutzungsspezifische Wasserbilanzanteile			landnutzungsspezifische Energiebilanzanteile			Ausgangssituation Flächen	Wasserbilanz Ausgangssituation			Energiebilanz Ausgangssituation		
	Verdunstung	Versickerung	Abfluss	Reflexion	Verd. Wärmestrom	fühlbare Wärme		Verdunstung	Versickerung	Abfluss	Reflexion	Verd. Wärmestrom	fühlbare Wärme
Dächer	137	0	650	336	341	1340	12.900	1.762	0	8.390	4.331	4.403	17.290
versiegelte Fläche BK1	137	65	585	403	341	1273	30.560	4.175	1.988	17.888	12.312	10.430	38.908
versiegelte Fläche BK2	137	195	455	671	341	1005	7.900	1.079	1.541	3.597	5.304	2.696	7.936
versiegelte Fläche BK3	210	346	231	671	526	820	150	32	52	35	101	79	123
versiegelte Fläche BK4	251	429	107	772	628	617	2.170	545	930	232	1.676	1.363	1.339
Sträucher	573	193	21	571	1432	15	1.190	682	229	25	679	1.704	18
Rasen	512	247	27	687	1280	51	12.080	6.190	2.986	332	8.293	15.464	612
Laubbäume	761	23	3	571	1901	-455	2.780	2.116	65	7	1.587	5.286	-1.264
Gründach extensiv 10 cm	305	0	482	671	761	585	2.580	780	0	1.235	1.719	1.948	1.497
Versickerungsmulde	545	240	2	671	1361	-15	3.000	1.635	719	7	2.014	4.084	-46
Ackerland	534	241	13	645	1333	39	6.800	3.629	1.636	86	4.383	9.067	268
Wiesen und Weiden	519	255	13	705	1296	16	13.400	6.953	3.413	180	9.447	17.372	213
Nadelwald	638	148	1	403	1593	21	20.480	13.059	3.028	31	8.251	32.627	437
Wasserfläche	780	0	7	224	1950	-116	600	468	0	4	134	1.170	-70
Wasser mit Wasserpflanzen	877	0	-90	224	2192	-358	900	790	0	-81	202	1.973	-323
	374	141	272	514	934	570	117.470	43.894	16.587	31.968	60.433	109.666	66.937
								47,5%	17,9%	34,6%	25,5%	46,3%	28,2%
								% der Jahresbilanz			% der Jahresbilanz		

Start Klima + Strahlungsdaten Berechnung Landnutzungsarten Flächen und Ergebnisse Daten Landnutzungsarten

Bereit



### Berechnung der Energiebilanz

- Die Energiebilanz wird für jede Spalte automatisch unmittelbar nach der Berechnung der Wasserbilanz ermittelt.
- Dazu wird der berechnete Jahresmittelwert der tatsächlichen Verdunstung übernommen. Dieser wird gemäß der Empfehlung im DWA Merkblatt „Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen“ Tafel 7.4 [DWA 1996] auf die einzelnen Monate aufgeteilt. Die damit und mit den Monatsmittelwerten der Strahlungsdaten berechneten Komponenten der Strahlungsbilanz werden anschließend als Jahreswerte zusammengefasst.
- Für jede Landnutzungsart ist ein separates Tabellenblatt erforderlich. Die Blätter sind ausgeblendet und können mit der Funktion „Menü Format -> Blatt -> Einblenden“ wieder angezeigt werden. Änderungen an den Monatswerten der Albedo der Landnutzungsarten sind jedoch auf dem Tabellenblatt „Daten Landnutzungsart“ vorzunehmen. Als Beispiel ist das Tabellenblatt für die Berechnung der Strahlungsbilanz der Landnutzungsart „Ackerland“ dargestellt.

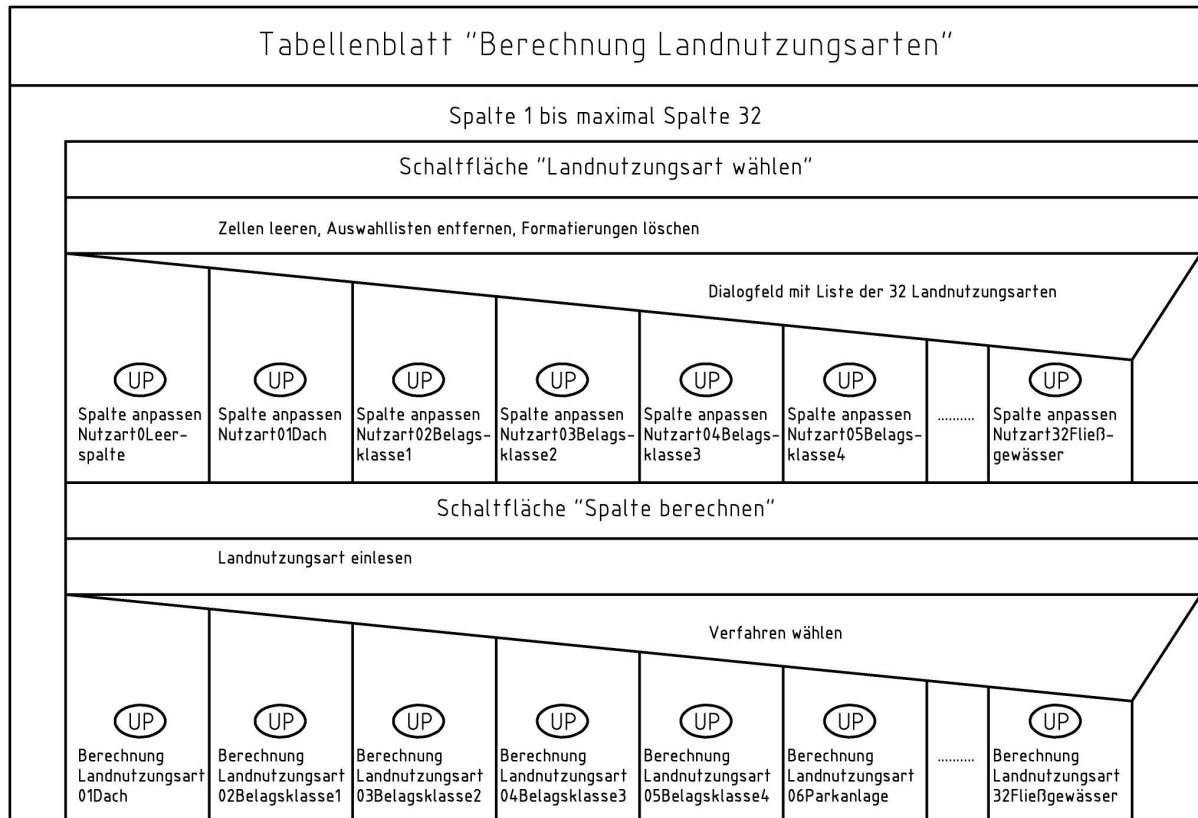
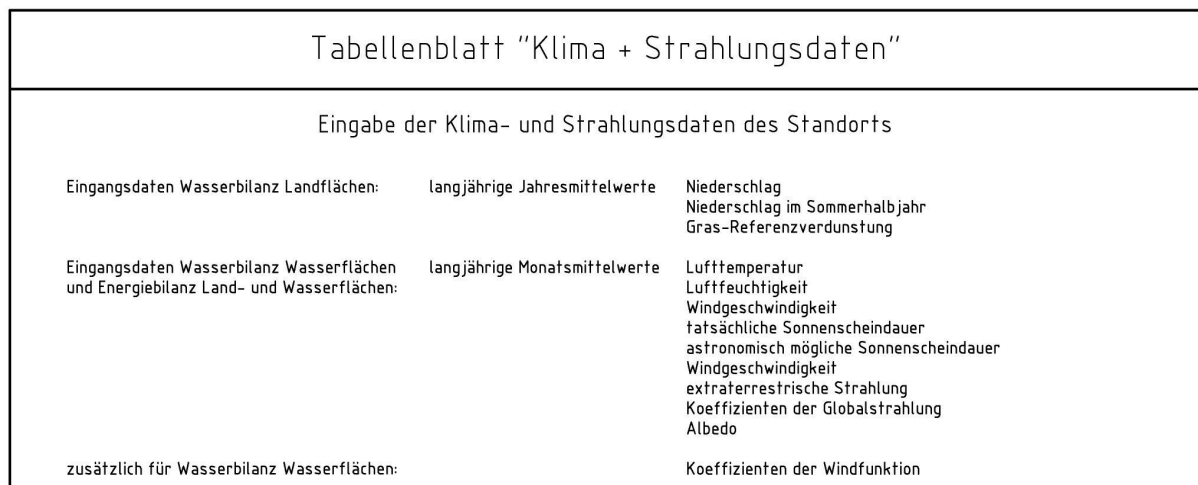
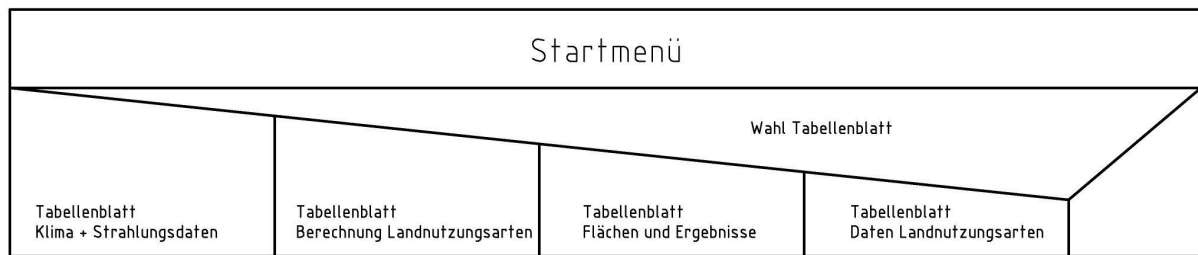
	A	I	J	K	L	M	O	Q	S	U	V	W
1		<b>Ackerland</b>										
2		Albedo der Oberfläche	tatsächliche Jahresverdunstung	Sättigungsdampfdruck	Dampfdruck der Luft	Globalstrahlung	kurzwellige Reflexion	effektive Abstrahlung der Oberfläche	Strahlungsbilanz	Verdunstungswärmestrom (=2,5 MJ/mm)	Strom fühlbarer Wärme	
3		$\alpha$	433	$e_s(T)$	$e$	$R_g$	$R_k$	$R_{nL}$	$R_n$	LE	H	
4		-	mm/mon	hPa	hPa	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> *mon)		
5	Januar	0,20	7	5,0	4,3	31	6,2	32,2	-7	4,5	-10,0	
6	Februar	0,20	11	5,4	4,5	55	11,0	37,4	7	7,5	-3,1	
7	März	0,20	20	7,0	5,5	92	18,3	41,8	32	13,5	10,0	
8	April	0,20	35	9,2	6,9	137	26,8	47,0	64	24,1	21,8	
9	Mai	0,19	61	12,9	9,3	174	33,0	48,5	92	42,1	26,5	
10	Juni	0,18	87	15,9	11,6	185	33,3	46,3	105	60,2	15,7	
11	Juli	0,18	82	17,8	12,8	181	32,5	46,9	101	57,1	18,3	
12	August	0,19	61	17,2	12,9	158	30,0	48,1	80	42,1	17,2	
13	September	0,21	35	14,3	11,3	120	25,2	48,3	46	24,1	9,3	
14	Oktober	0,20	20	10,7	8,8	79	15,7	48,7	14	13,5	-3,0	
15	November	0,20	11	7,4	6,3	38	7,6	34,5	-4	7,5	-10,4	
16	Dezember	0,20	7	5,6	4,8	25	4,9	29,6	-10	4,5	-11,9	
17		Strahlungsleistung im Jahresdurchschnitt				106,4	20,4	42,5	43,5	34,3	9,2 [W/m <sup>2</sup> ]	
18		Jahressumme der Strahlungsmenge				932,6	179,1	372,2	381,3	300,8	80,5 [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	
19		Jahressumme der Strahlungsmenge				3357	645	1340	1373	1083	290 MJ/(m <sup>2</sup> × a)	

#### 4. Blatt „Daten der Landnutzungsarten“

Im Tabellenblatt „Daten der Landnutzungsarten“ sind die Vorgabewerte zusammengefasst. Dazu gehören:

- Bezeichnungen der Landnutzungsarten
- Anteil der Versickerung am Gesamtabfluss der Landnutzungsarten
- Monatswerte der Albedo der Landnutzungsarten
- Liste der Bodenarten und deren Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität
- Werte der Auswahllisten für Hangausrichtung, Dachneigung, Baumart und Standortfaktoren hinsichtlich Lage und Wasserverfügbarkeit

## 5. Struktogramm des Berechnungsablaufs



<p>UP Spalte anpassen – für Landnutzungsart 01 bis 32</p>
<p>Landnutzungsart in Spalte eintragen Zellen mit erforderlichen Eingaben grau färben Auswahllisten erstellen Besondere Angaben der Landnutzungsarte eintragen Vorgabewerte eintragen</p>

<p>UP Spalte berechnen – für Spalten 1 bis 32</p>
<p>in Abhängigkeit von der Landnutzungsart erforderliche Zellen der Spalte einlesen</p>
<p>Prüfung auf Vollständigkeit der Eingabewerte</p>
<p>Für Landnutzungsart geforderte Daten vorhanden?</p>
<p>ja</p>
<p>nein</p>
<p>Variablen entsprechend der Landnutzungsart setzen</p>
<p>UP Einlesen der meteorologischen Daten</p>
<p>UP Berechnung des Koeffizienten f</p>
<p>UP Berechnung der Ausschöpfungstiefe We</p>
<p>UP Berechnung des kapillaren Aufstiegs KA</p>
<p>UP Berechnung des Bagrov-Parameters n</p>
<p>UP Berechnung des Koeffizienten Hangneigung und -ausrichtung</p>
<p>UP Berechnung der tatsächlichen Verdunstung</p>
<p>UP Berechnung der Wasser- und Energiebilanz</p>
<p>Felder mit fehlenden Angaben rot färben Fehlermeldung Ende</p>

<p>UP Einlesen der meteorologischen Daten</p>
<p>Meteorologische Daten aus Tabellenblatt "Klima + Strahlungsdaten" einlesen</p>

<p>UP Berechnung des Koeffizienten f</p>
<p>Grünland</p>
<p>Ackerland</p>
<p>Laubwald</p>
<p>Nadelwald</p>
<p>Unterschiedliche Berechnungsformeln je nach Pflanzenart</p>

<p>UP Berechnung der Ausschöpfungstiefe We</p>
<p>Grünland</p>
<p>Ackerland</p>
<p>Laubwald</p>
<p>Nadelwald</p>
<p>Unterschiedliche Berechnungsformeln je nach Pflanzenart</p>

UP Berechnung des kapillaren Aufstiegs KA										
Unterschiedliche Berechnungsformeln je nach Bodenart										
Sand rein	Sand lehmig	Sand tonig	Lehm sandig	Lehm tonig	Schluff sandig	Schluff lehmig	Schluff tonig	Ton lehmig	Ton schluffig	

UP Berechnung des Bagrov-Parameters n				
Unterschiedliche Berechnungsformeln je nach Pflanzenart				
Grünland	Ackerland	Laubwald	Nadelwald	

UP Berechnung des Koeffizienten Hangneigung und -ausrichtung					
Unterschiedliche Berechnungsformeln je nach Hangausrichtung					
Nord	Nordost/Nordwest	Ost/West	Südost/Südwest	Süd	Hangneigung=0

UP Berechnung der tatsächlichen Verdunstung
Berechnung der tatsächlichen Verdunstung mit der Bagrov-Beziehung

UP Berechnung der Wasser- und Energiebilanz für Landflächen							
Gesamtabfluss = Niederschlag - tatsächliche Verdunstung Anteil Versickerung und Oberflächenabfluss anhand Eingabewert Versickerungsanteil							
Tabellenblatt für Berechnung der Energiebilanz in Abhängigkeit von der Landnutzungsart wählen (ausgeblendet)							
Landnutzungsart 01Dach	Landnutzungsart 02Belagsklasse1	Landnutzungsart 03Belagsklasse2	Landnutzungsart 04Belagsklasse3	Landnutzungsart 05Belagsklasse4	Landnutzungsart 06Parkanlage	.....	Landnutzungsart 29SpärlVegetat.
tatsächliche Verdunstung ein Tabelle eintragen Komponenten der Energiebilanz auslesen							

UP Temperaturgleichgewichtsverfahren
Aufruf Tabellenblatt "ETa Wasserfläche" (ausgeblendet)
Iteration im Temperaturgleichgewichtsverfahren mit Energieansatz und Massentransportansatz Variable = Temperatur der Wasseroberfläche

<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px 5px; margin-right: 10px;">UP</div> <div>Berechnung der Wasser- und Energiebilanz für Wasserflächen</div> </div>					
Abfluss = Niederschlag - tatsächliche Verdunstung					
Landnutzungsart 30Wasser		Landnutzungsart 31WasserMitPflanzen		Landnutzungsart 32Fließgewässer	Tabellenblatt für Berechnung der Energiebilanz in Abhängigkeit von der Art der Wasserfläche wählen (ausgeblendet)
tatsächliche Verdunstung ein Tabelle eintragen Komponenten der Energiebilanz auslesen					

Tabellenblatt "Flächen und Ergebnisse"	
Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse durch das Programm	
Übersicht der Teilflächen	Landnutzungsart Größe der Teilfläche
Ergebnis Wasserbilanz	Verdunstung Versickerung Oberflächenabfluss
Ergebnis Wasserbilanz	Reflexion Verdunstungswärmestrom Fühlbarer Wärmestrom
Angaben für Teilflächen und für Gesamtfläche	

Tabellenblatt "Daten Landnutzungsarten"	
Eingabewerte für die Berechnung	
Anteile Versickerung und Oberflächenabfluss am Gesamtabfluss Monatswerte Albedo der Landnutzungsarten Liste der Bodenarten und zugehörige Bodenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität Daten für Auswahllisten (Hangausrichtung, Dachneigung, Baumart, Standortfaktoren, Löß/Schwarzerde, Bezeichnungen der Landnutzungsarten)	

**Tabelle A-1    Übersicht der geforderten Eingabewerte für alle Landnutzungsarten**

<b>Versiegelte Flächen</b>		
Dachflächen	Dachneigung:  Versickerungsanteil: Bagrov-Parameter n:	aus Auswahlliste: Dachneigung >15° Dachneigung ≤15°  0% Vorgabe für >15° n=0,09; für ≤15° n=0,11
Belagsklasse 1 (Asphalt, Beton)	Hangneigung: Hangausrichtung: Versickerungsanteil: Bagrov-Parameter n:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S 10 % des Gesamtabflusses Vorgabe n=0,11
Belagsklasse 2 (Großpflaster, Betonverbundpflaster, Plattenbeläge mit Kantenlängen >8cm)	Hangneigung: Hangausrichtung: Versickerungsanteil: Bagrov-Parameter n:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S 30 % des Gesamtabflusses Vorgabe n=0,11
Belagsklasse 3 (Kleinpflaster, Mosaikpflaster, Plattenbeläge mit Kantenlängen <8cm)	Hangneigung: Hangausrichtung: Versickerungsanteil: Bagrov-Parameter n:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S 60 % des Gesamtabflusses Vorgabe n=0,25
Belagsklasse 4 (Rasengitterstein, Schotterrassen)	Hangneigung: Hangausrichtung: Versickerungsanteil: Bagrov-Parameter n:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S 80 % des Gesamtabflusses Vorgabe n=0,40
<b>Bewachsene Flächen in bebauten Gebieten</b>		
Parkanlage	Berechnungsansatz: 50% Grünland mit 12 cm Pflanzenhöhe und 50% Laubwald mit Umtriebsalter 100a Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Anteil Rasenfläche: Beregnungsmenge:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen automat. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 99 % des Gesamtabflusses Angabe in [%] Angabe in [mm/a]
Sträucher, Büsche	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Anteil Rasenfläche: Standortfaktor Lage: Standortfaktor Wasser:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen automat. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 90 % des Gesamtabflusses Angabe in [%] Auswahlliste: Grünfläche / versiegelte Fläche günstig / mittel / ungünstig
Wiese, Rasen	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Beregnungsmenge:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen automat. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 90 % des Gesamtabflusses Angabe in [mm/a]

Einzelbäume	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Baumart: Lebenserwartung:  Standortfaktor Lage:  Standortfaktor Wasser:	Angabe in [°] NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen autom. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 90 % des Gesamtabflusses Auswahlliste: Laubbaum / Nadelbaum Vorgabe: 150a Laubbaum / 100a Nadelbaum Auswahlliste: Grünfläche / versiegelte Fläche günstig / mittel / ungünstig
Gründach, extensiv, Aufbau bis 10 cm Stärke	Hangneigung: Hangausrichtung: Versickerungsanteil: Bagrov-Parameter n:	Angabe in [°] NO/NW, O/W, SO/SW, S 0% Vorgabe n=0,7
Gründach, extensiv, Aufbau >10 bis 20 cm Stärke	Hangneigung: Hangausrichtung: Versickerungsanteil: Bagrov-Parameter n:	Angabe in [°] NO/NW, O/W, SO/SW, S 0% Vorgabe n=1,25
Gründach, intensiv, Aufbau >20 bis 50 cm Stärke	Berechnungsansatz: Grünland mit 12 cm Pflanzenhöhe und 20% Bodenfeuchte Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Versickerungsanteil: Berechnungsmenge:	Angabe in [°] NO/NW, O/W, SO/SW, S Vorgabe: künstliches Substrat Vorgabe: 20% für künstliches Substrat 0% Angabe in [mm/a]
Gründach, intensiv, Aufbau >50 cm Stärke	Berechnungsansatz: 70% Grünland mit 20 cm Pflanzenhöhe, 22% Bodenfeuchte und 30% Sträucher mit Standortfaktoren Lage / Wasser Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Versickerungsanteil: Berechnungsmenge:	Angabe in [°] NO/NW, O/W, SO/SW, S Vorgabe: künstliches Substrat Vorgabe: 22% für künstliches Substrat 0% Angabe in [mm/a]
Fassadenbegrünung	Berechnungsansatz: Laubwald, Umtriebsalter wird über Fassadenhöhe geschätzt Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Versickerungsanteil: Fassadenhöhe:	aus Auswahlliste wählen autom. Eintrag entsprechend Bodenart 80 % des Gesamtabflusses Angabe in [m]
Versickerungsmulden	Berechnungsansatz: Grünland, zusätzlicher Zufluss wird in Berechnungsmenge umgerechnet Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Versickerungsanteil: Angeschlossene Fläche: Jahresabflussbeiwert:	aus Auswahlliste wählen autom. Eintrag entsprechend Bodenart 99 % des Gesamtabflusses Angabe in [m²] Wert zwischen 0 und 1

Komplexe Parzellenstrukturen / Kleingärten	Berechnungsansatz: 35% Grünland mit 20 cm Pflanzenhöhe, 25% Laubwald mit Umtriebsalter 25a, 40% Ackerland	
	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Berechnungsmenge: Löß / Schwarzerde:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen autom. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 90 % des Gesamtabflusses Angabe in [mm/a] Auswahlliste ja / nein
<b>Landwirtschaftliche Flächen</b>		
Ackerland	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Berechnungsmenge: Löß / Schwarzerde:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen autom. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 95 % des Gesamtabflusses Angabe in [mm/a] Auswahlliste ja / nein
Weinbauflächen	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen autom. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 70 % des Gesamtabflusses
Obst- und Beerenobstbestände	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen autom. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 90 % des Gesamtabflusses
Wiesen und Weiden	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Pflanzenhöhe:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen autom. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 90 % des Gesamtabflusses Vorgabe 15 cm
<b>Wälder und naturnahe Flächen</b>		
Laubwälder	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Umtriebsalter:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen autom. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 99 % des Gesamtabflusses Vorgabe 150a



Nadelwälder	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Umtriebsalter:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen automat. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 99 % des Gesamtabflusses Vorgabe 100a
Mischwälder	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Umtriebsalter: Anteil Laubwald:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen automat. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 99 % des Gesamtabflusses Vorgabe 120a Angabe in [%]
Natürliches Grünland	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Pflanzenhöhe:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen automat. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 95 % des Gesamtabflusses Vorgabe 15 cm
Heiden und Moorheiden	Berechnungsansatz: 50% Grünland mit 20 cm Pflanzenhöhe, 50% Laubwald mit Umtriebsalter 50a	
	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Pflanzenhöhe: Baumanteil: Umtriebsalter:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen automat. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 95 % des Gesamtabflusses Vorgabe 20 cm Vorgabe 50% Vorgabe 50a
Wald-Strauch-Übergangsstadien	Berechnungsansatz: Laubwald mit Umtriebsalter 10a und Nadelwald mit Umtriebsalter 15a	
	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Anteil Laubwald:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen automat. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 95 % des Gesamtabflusses Vorgabe 50%
Strände, Dünen und Sandflächen	Berechnungsansatz: vegetationslose Fläche	
	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen automat. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 90 % des Gesamtabflusses

Felsflächen ohne Vegetation	Berechnungsansatz: versiegelte Fläche	
	Hangneigung: Hangausrichtung: Versickerungsanteil: Bagrov-Parameter n:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S 90 % des Gesamtabflusses Vorgabe n=0,11
Flächen mit spärlicher Vegetation	Berechnungsansatz: 80% versiegelte Fläche, 20% Grünland mit 12 cm Pflanzenhöhe	
	Hangneigung: Hangausrichtung: Bodenart: Bodenfeuchte der nFK: Grundwasserflurabstand: Versickerungsanteil: Anteil Grünland:	Angabe in [°] N, NO/NW, O/W, SO/SW, S aus Auswahlliste wählen automat. Eintrag entsprechend Bodenart Angabe in [m] 80 % des Gesamtabflusses Vorgabe 20%
<b>Wasserflächen</b>		
Stehende Gewässer	Gewässerbreite in Hauptwindrichtung:	Angabe in [m]
Wasserflächen mit Wasserpflanzen	Gewässerbreite in Hauptwindrichtung:	Angabe in [m]
	Anteil Wasserpflanzen: Pflanzenart: Verdunstung Wasserpfl.:	Angabe in [%] Auswahlliste: Schilf, Binsen / Teichlilien automat. Eintrag entsprechend Pflanzenart
Fließgewässer	mittlere Gewässerbreite:	Angabe in [m]

Ralf Harlaß  
Eibenweg 12  
08209 Auerbach / Reumtengrün

### **Lebenslauf**

Geburtsdatum: 16.12.1961  
Geburtsort: Radeberg, Kreis Dresden-Land

Familienstand: verheiratet, 3 Kinder

Ausbildungsweg:

1968 - 1976	Polytechnische Oberschule, Ellefeld (1. bis 8. Klasse)
1976 - 1979	Erweiterte Oberschule „Geschwister Scholl“, Auerbach (9. bis 11. Klasse)
1979 - 1980	Arbeiter- und Bauernfakultät an der Martin-Luther-Universität in Halle, Abitur und Vorbereitung auf ein Auslandsstudium (12. Klasse)
1980 - 1985	Studium am Bergbauinstitut Moskau Abschluss als Diplombergbauingenieur
1996 - 2002	Fernstudium an der Technischen Universität Dresden Abschluss als Diplombauingenieur
2003 - 2008	externer Doktorand an der Technischen Universität Dresden, Lehrstuhl Stadtbauwesen

Berufsweg:

1985 - 1990	Braunkohlenkombinat Bitterfeld
1985 - 1986	Tagebau Goitzsche, Schichtleiter Abraumbetrieb
1986 - 1987	Tagebau Goitzsche, Betriebsingenieur Grubenbetrieb
1987 - 1990	Tagebau Köckern, Hauptingenieur
1990 - 1991	Gebrüder Röber KG, Auerbach Technischer Leiter
1991 - 1994	Westbau GmbH, Falkenstein Bauplaner für Hoch- und Tiefbau
seit 1994	Ingenieurbüro Pfaff, Falkenstein Projektingenieur Tiefbau

Auerbach, den 8. Oktober 2008